

# **Entwicklung automatisierter Messverfahren für Vortriebskontrollen beim Rohrvortrieb**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

**Dissertation**

von  
Rolf Kemper-Böninghausen  
geboren am 2. August 1957  
aus Essen

Eingereicht am: 12. Januar 2018

Disputation am: 15. Juni 2018

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger

2018



# Inhaltsverzeichnis

## Kurzfassung Executive Summary

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Motivation	2
<b>2</b>	<b>Das Projekt „Umbau des Emschersystems“</b>	<b>4</b>
2.1	Wahl des Bauverfahrens	6
2.1.1	Offene Bauweise	7
2.1.2	Rohrvortriebstechnik	7
2.1.3	Tübbingbauweise	9
2.2	Auswahl der Tunnelvortriebsmaschine	10
<b>3</b>	<b>Ingenieurgeodäsie in Tunnelbauprojekten</b>	<b>12</b>
3.1	Erstellung der Planungsunterlagen für Tunnelbaumaßnahmen	14
3.2	Amtliche Lage- und Höhensysteme	16
3.2.1	Amtliche Lagesysteme	17
3.2.2	Amtliche Höhensysteme	18
3.3	Lage- und Höhensysteme im Emschergebiet	20
3.3.1	Kommunalisierung der Katasterverwaltungen	20
3.3.2	Steinkohlenabbau im Ruhr- und Emschergebiet	20
3.3.3	Auswirkungen der Setzungsproblematik in den Emscher-Projekten	23
3.3.4	Lage- und Höhenbezugssystemwechsel im Emscherprojekt	24
3.4	Berücksichtigung der Höhen- und Lageproblematik	25
3.4.1	Höhen	25
3.4.2	Lage	26
3.5	Aufbau von Vermessungsnetzen	27
3.6	Grundlagennetze	28
3.6.1	Allgemeines	28
3.6.2	Grundlagennetze im Projekt Abwasserkanal Emscher	37
3.7	Portalnetz	39
3.7.1	Anlage der Portalnetze	39
3.7.2	Übertragung des Portalnetzes in den Startschacht	41
3.7.3	Optische Lotung	43
3.7.4	Mechanische Lotung	45
3.7.5	Gegenseitige Visuren	46
3.7.6	Einseitige Steilvisuren	46
3.7.7	Messpunktübertragung in Projekten der Emschergenossenschaft	47
3.8	Vortriebsnetz	47
3.9	Kreismessungen	52
3.10	Aufbau von Vermessungspunkten im Rohrstrang	53
<b>4</b>	<b>Rohrvortriebskontrollvermessungen</b>	<b>56</b>
4.1	Herkömmliche Rohrvortriebskontrollvermessungen	57
4.2	Rohrvortriebskontrollvermessungen im Emscherprojekt	58

4.3	Vortriebssteuerung durch verschiedene Navigationssysteme	60
4.3.1	Navigation bei gerader Trassierung	60
4.3.2	Navigation bei gekrümmtem Trassenverlauf	61
4.3.3	Navigation mit mitfahrenden Messstationen, automatisierter Polygonzug	62
4.3.4	Mitfahrendes Lasertheodolitsystem mit elektronischer Zieltafel	63
<b>5</b>	<b>Neue Verfahren für Rohrvortriebskontrollvermessungen</b>	<b>64</b>
5.1	Erstes Alternativverfahren: Messfahrzeuge mit Elektroantrieb	65
5.2	Weiterentwicklung zum voll portablen Messsystem	72
5.3	Zusammenfassung der Messverfahren für Rohrvortriebskontrollen	75
<b>6</b>	<b>Autonome Rohrvortriebskontrollvermessung mit Messroboter</b>	<b>76</b>
6.1	Der Messablauf für die autonome Rohrvortriebskontrollvermessung	77
6.2	Der Messroboter	79
6.3	Das Vortriebsnetz für das autonome Messverfahren	79
6.4	Messprismen und Zubehör für den Einsatz des Messroboters	82
6.5	Wahl des Dreifußes	85
6.6	Sensoren im Messroboter	86
6.6.1	Inertiales Messsystem	88
6.6.2	Laserscanner	88
6.6.3	Hodometer	89
6.6.4	Roboterfahrstabilität im Tunnel	89
6.7	Vorbereitende Arbeiten für die autonome Messfahrt	91
6.7.1	Zielweitenberechnung	91
6.7.2	Näherungskoordinaten für die Messprismen und Messroboterstandpunkte	94
6.7.3	Rohrsohlenkoordinatenberechnung	97
6.7.4	In-situ Hodometerkalibrierung	100
6.8	Messroboterpositionierung im ersten Messpunktfeld	104
6.8.1	Positionierungsfall 1	104
6.8.2	Positionierungsfall 2	106
6.8.3	Messroboterabstand zum Prismenring	107
6.9	Messungen innerhalb der Messpunktfelder	108
6.10	Suche der Messprismen 3 und 4	109
6.10.1	Roboterschrägstellungen	110
6.10.2	Roboterquerstellungen	110
6.10.3	Roboterquerneigungen	112
6.10.4	Berechnung der endgültigen Horizontalrichtung $R_3$ und Bestimmung der Richtung $R_4$	112
6.10.5	Roboterlängsneigungen und Berechnung der Vertikal-suchwinkel $VS_{MR}^3$ und $VS_{MR}^4$	113
6.10.6	Kippachshöhenberechnung	114
6.10.7	Lageänderung des Tachymeterzentrums durch Roboterlängsneigungen	116
6.11	Koordinierung des Tachymeterstandpunktes	117
6.12	Genauigkeitsabschätzungen der Sensoren mit Berücksichtigung im Messablauf	118
6.12.1	Roboterquerstellungen und deren Berücksichtigung im Messablauf	118
6.12.2	Hodometergenauigkeiten und deren Berücksichtigung im Messablauf	120



6.12.3	Rollwinkelgenauigkeiten und deren Berücksichtigung im Messablauf	121
6.12.4	Nickwinkelgenauigkeiten und deren Berücksichtigung im Messablauf	122
6.12.5	Genauigkeitsabschätzungen der Höhenkorrekturen $\Delta h_{\Omega_Y}$ und $\Delta h_{\Omega_X}$ sowie der Lageänderungen $\Delta l_{\Omega_X}$ und deren Berücksichtigung im Messablauf	123
6.12.6	Die Genauigkeitsabschätzung in der Zusammenfassung	124
6.13	Berechnung der Horizontalrichtungen für die Suche der Prismen 1, 2, 5 und 6	124
6.14	Berechnung der Vertikalwinkel für die Suche der Prismen 1, 2, 5 und 6	127
6.14.1	Berechnung der Vertikalwinkelverbesserungen	127
6.14.2	Berechnung von Querneigungswerten	128
6.14.3	Berechnung der endgültigen Vertikalwinkel für die Prismensuche	131
6.15	Ausschluss von falschen Prismenanzielungen	133
6.16	Abschlusskontrolle für die Prismensuche	134
6.17	Prismenkoordinatenberechnung im Tachymeterschrägsystem	136
6.18	Überführung der Tachymeterkoordinaten in das Vortriebsnetz	137
<b>7</b>	<b>Die Messverfahren im Vergleich mittels Simulationsberechnungen</b>	<b>142</b>
7.1	Netzsimulationen	143
7.2	Vergleich der Messverfahren und Berechnung von Genauigkeitssteigerungen	147
7.3	Zuverlässigkeitsmaße für Netzmessungen	148
7.3.1	Zuverlässigkeitsmaße für die Herablegungsmessung mit 3 und 6 Kopfbalkenprismen	149
7.3.2	Zuverlässigkeitsmaße für die Polygonzugmessung	150
7.3.3	Zuverlässigkeitsmaße für das Messroboterverfahren	150
7.4	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Werten aus der Praxis	151
<b>8</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die autonome Vortriebskontrolle</b>	<b>154</b>
8.1	Zeiten und Kosten bei herkömmlichen Rohrvortriebskontrollvermessungen	154
8.2	Zeiten der autonomen Rohrvortriebskontrollvermessung	155
8.3	Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	157
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>160</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>169</b>



## Kurzfassung

Rolf Kemper-Böninghausen: „Entwicklung automatisierter Messverfahren für Vortriebskontrollen beim Rohrvortrieb“

Stichwörter: Tunnelbau, Vermessungsnetze, Navigationssysteme, Vortriebskontrollvermessungen, Messprismen, autonomer Messroboter

Tunnelvortriebsmaschinen werden eingesetzt, um weitestgehend ohne größere Eingriffe in oberirdischen Geländestrukturen unterirdische Tunnel und Kanäle für Straßen- und Bahntunnel sowie für wasser- und abwassertechnische Anlagen zu errichten.

In der vorliegenden Arbeit werden die Entwicklungen automatisierter Messverfahren beschrieben, die eine Alternative zu den herkömmlichen Vortriebskontrollvermessungen darstellen. Die Kontrollvermessungen sind wesentlicher Bestandteil für einen zielgerichteten Vortrieb.

Die speziellen Eigenschaften und Randbedingungen bei Vortriebsarbeiten, aufgezeigt in der Projektbeschreibung „Umbau des Emschersystems“, werden herausgearbeitet. Hierzu zählen die Wahl der verschiedenen Bauverfahren und die Rohrvortriebstechnik.

Für einen planmäßigen Vortrieb und eine sichere Einfahrt in den Zielschacht sind Vermessungsnetze, bestehend aus Grundlagen-, Portal- und Vortriebsnetzen, eine Grundvoraussetzung. Es wird gezeigt, dass die Methodenlehre der Netzkonfiguration und die Datumsfestlegungen einen entscheidenden Einfluss auf die Vortriebsgenauigkeit haben.

Die Steuerung der Vortriebsmaschinen erfolgt über Navigationssysteme, die aus Lasertheodolit- und Schlauchwaagensystemen sowie Tachymeter bestehen. Die unterschiedlichen Systeme mit ihren projektspezifischen Parametern werden erläutert und in Verbindung mit den Rohrvortriebskontrollvermessungen gesetzt.

Basierend auf den Beschreibungen der gebräuchlichen Vortriebskontrollvermessungen wird die Entwicklung der neuen Messverfahren erläutert, die über mehrere Schritte zu dem Bau eines autonomen Messroboters geführt haben. Die in der Praxis gebräuchlichen Vortriebsnetze, Messinstrumente und Gerätschaften werden beschrieben, um daraus Erkenntnisse für das neue autonome Messverfahren ableiten zu können. Die Umsetzung erfolgt über ein darauf abgestimmtes Vortriebsnetz, welches auch eine Neuentwicklung der für das Verfahren unabdingbar wichtigen Messprismen beinhaltet.

Die Vorteile des autonomen Messverfahrens mit dem Roboter liegen in einer geringeren Kontrollmesszeit und der damit verbundenen Reduzierung von Baustillstandszeiten. Darüber hinaus entfällt ein Begehen in Rohren mit geringen Durchmessern. Mit der Elimination von gesundheitlichen Beeinträchtigungen werden Forderungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes berücksichtigt.

Anhand von Simulationsberechnungen wird gezeigt, dass das autonome Messverfahren zu einer Verbesserung bei den Genauigkeiten am Durchschlagspunkt des Zielschachtes führt. Die geringeren Messzeiten führen zu einer Zeit- und Kosteneinsparung.

Die Ergebnisse unterstreichen, dass der autonome Messroboter eine effiziente Alternative zu hergebrachten Kontrollmessverfahren darstellt.

## Executive Summary

Rolf Kemper-Böninghausen: „Developing automated methods for pipe driving control surveying”

Keywords: Tunnel construction, surveying networks, navigational systems, pipe driving control surveying, surveying prisms, autonomous surveying robot

Pipe driving machines are used to construct underground road and railway tunnels as well as water and wastewater canals with minimum impact on existing structures above ground.

Control surveying is an integral part of targeted pipe driving. The thesis at hand describes the development of automated surveying methods that are an alternative to conventional forms of control surveying in the context of pipe driving.

This thesis describes the specific properties and boundary conditions of pipe driving works, using as an example the reconstruction of the Emscher river system. Those properties and boundary conditions include the choice between different construction methods as well as pipe driving techniques.

Orderly pipe driving and safe entry into the target shaft require the setup of base, portal, and pipe driving networks. The thesis shows that it is primarily the network configuration and the determination of the geodetic datum which have a decisive impact on pipe driving accuracy.

Pipe driving machines are steered via navigational systems using laser theodolite and hydrostatic level systems as well as tachymeters. The thesis describes the different systems and their project-specific parameters and places them in the context of pipe driving control surveying.

Based on descriptions of conventional forms of pipe driving control surveying, the thesis explains the development of new forms of surveying which, through a number of steps, resulted in the construction of an autonomous surveying robot. The pipe driving networks and surveying instruments that have already been in practical use for some time are described in order to derive insights into the new, autonomous method of surveying. This new method is implemented using a pipe driving network specifically geared to this purpose, which crucially also includes the required surveying prism.

The advantages of the autonomous method are reduced control surveying times and the associated decrease in construction standstill times. In addition, the autonomous method obviates the need for on-site inspection in small-diameter pipes, and the concomitant elimination of health risks is in line with the requirements of occupational safety and health protection.

The thesis also shows, on the basis of simulations, that the autonomous surveying method leads to an improvement in pipe driving accuracy. Moreover, the reduced surveying times lead to time and cost savings.

The results therefore highlight that the autonomous surveying robot constitutes an efficient alternative to conventional methods of control surveying in the context of pipe driving.

### 1. Einführung

In der öffentlichen Wahrnehmung verbinden sich Vortriebsarbeiten besonders mit Tunnelprojekten für die Verkehrsinfrastruktur. Darunter fallen Straßen- und Eisenbahntunnelprojekte, die geplant und gebaut werden, um eine verkehrstechnische Durchgängigkeit z. B. zwischen den nord- und südeuropäischen Staaten zu erreichen. Die konsequente Erweiterung vorhandener Verkehrsnetze mit der Tunnelbaumethode findet auf allen Kontinenten statt. Als ein aktuelles Eisenbahntunnelprojekt sei der ca. 57 Kilometer lange Gotthard-Basistunnel genannt, der die Schweiz mit Italien verbindet. Am 1. Juni 2016 wurde der Eisenbahntunnel eingeweiht.

Ein Projekt anderer Art in ähnlicher Größenordnung ist das Jahrhundertprojekt „Umbau des Emschersystems“. In einer durch den Steinkohlenbergbau stark geprägten Region in Nordrhein-Westfalen (NRW) wird das zurzeit noch offen geführte Abwassersystem durch den Bau von unterirdischen Kanälen im Vortriebsverfahren ersetzt.

Auf dieses Projekt wird im Verlauf dieser Arbeit im Hinblick auf die vermessungstechnische Begleitung der Vortriebsarbeiten immer wieder Bezug genommen. Es ist Auslöser für die Entwicklung automatisierter Messverfahren für Vortriebskontrollen beim Rohrvortrieb.

Im Tunnelbau bietet die Vortriebstechnik auf Grund der äußerst geringen Beeinträchtigung von oberirdischen Bebauungen eine wirtschaftliche Alternative zur offenen Bauweise. Besonders in urbanen Bereichen mit beengten Verhältnissen hinsichtlich der differenzierten Infrastruktureinrichtungen kommt dem Vortriebsverfahren eine hohe Bedeutung zu.

Der durch die Vortriebsmaschine entzogene Boden schafft Platz für die Anlage von unterirdischen Bauwerken, seien es Verkehrsanlagen für Eisenbahnen oder U-Bahnen, Leitungstrassen für Versorgungsunternehmen oder für wasser- und abwassertechnische Anlagen.

Auf dem Gebiet der Vortriebstechnik sind rasante Entwicklungen eingetreten. Höhere Vortriebsgeschwindigkeiten, längere Haltungen, geringere Überdeckungen usw. sind technisch beherrschbar geworden und ermöglichen so den Bau neuer Verkehrsanlagen in den durch die steigende Weltbevölkerungszahl an Bedeutung zunehmenden Metropolen und Innenstädten. Der erreichte hohe technische Stand bedarf aber nach wie vor einer intensiven Überwachung während der Bauausführung. Neben der richtigen Auswahl u. a. des Vortriebsverfahrens, der Kenntnisse der projektspezifischen Parameter und der Einhaltung von Fertigstellungsterminen sind für den Vortrieb hinlängliche Vorkehrungen für die Einhaltung der geplanten Trasse bis zur genauen Einfahrt in den Zielschacht zu treffen. Fehlerhafte Steuerbewegungen des Vortriebsschildes, falsch berechnete Pressenkräfte usw. können beim Vortrieb zu irreparablen Schäden an den Tunneleinbauten führen.

Die Ingenieurgeodäsie ist mit ihren Messverfahren und Messinstrumenten für diesen Bauprozess notwendig, um dem Bauherrn ein qualitätsgesichertes Bauwerk übergeben zu können.

Für die planmäßige Auffahrung einer Vortriebsstrecke ist zu jeder Zeit die Kenntnis der richtigen Position der Vortriebsmaschine im vorgegebenen Koordinatensystem entscheidend. Für den Bau von Kanälen und Tunneln in Vortriebsbaumaßnahmen sind demzufolge ständig vermessungstechnische Kontrollvermessungen durchzuführen, die ihrerseits auf Messkonzepten beruhen und fortlaufend den spezifischen Projektparametern anzupassen sind. Zu diesen gehören u. a. der Kanal- bzw. Tunneldurchmesser und die Länge des Tunnels.

### 1.1 Aufgabenstellung

Vortriebskontrollvermessungen werden durchgeführt, um periodisch die Lage und Höhe des zu diesem Zeitpunkt aufgefahrenen Tunnels zu überprüfen. Diese können nur erfolgen, wenn der Vortrieb ruht. Hierfür sind im Bauprozess Stillstandszeiten einzuplanen, in denen die Vermessungen durchgeführt werden können.

Die Messzeiten für eine Kontrollvermessung zu reduzieren bedeutet einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung der Baustillstandszeiten und damit zu einer Reduzierung der Baukosten. Die Baufirmen sind bestrebt, die Baustillstandszeiten für die notwendigen Kontrollvermessungen aus wirtschaftlichen Gründen möglichst gering zu halten. Die Baustillstandszeiten werden bei den Baufirmen für ihre Eigenüberwachungsmessungen in ihrem Bauzeitenplan ebenso berücksichtigt wie die Stillstandszeiten für die auftraggeberseitigen Vortriebskontrollvermessungen.

Die benötigten Zeiten für die Kontrollvermessungen wachsen mit der Länge der Vortriebsstrecke. Die ersten Haltungsmeter können in der Regel noch in den Pausenzeiten der Baumannschaft eingemessen werden. Mit jedem weiteren Meter Vortrieb erhöht sich die Stillstandszeit, bis für eine Haltungslänge beispielsweise von 600m eine Vermessungszeit von 3-5 Stunden einzuplanen ist. Diese hängt u. a. von den Trassierungselementen und Kurvenradien ab. Je kleiner der Radius, desto kürzer werden die Abstände zwischen den Messpunkten im Tunnel. Damit erhöht sich die Anzahl der Aufstellungen, was gleichzeitig zu einer Verlängerung der Messzeiten führt.

Einen Einfluss auf die Messzeiten haben die geplanten Tunneldurchmesser. Arbeiten in Vortrieben mit geringen Durchmessern bedeuten auf Grund der körperlichen Belastung eine längere Verweildauer im Tunnel für die Kontrollvermessungsarbeiten. Kontrollvermessungen in Tunneln mit einem Durchmesser von z. B. DN1600 können nur in ständig gebückter Haltung durchgeführt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass jeder, der sich im Tunnel aufhalten muss, aus Sicherheitsgründen einen Schutzhelm tragen muss. Damit erhöht sich die Körpergröße um weitere 20cm. Das anstrengende Gehen in der ergonomisch ungünstigen Haltung wird darüber hinaus noch gesteigert, indem Materialien mitgeführt werden müssen. Beim Messpersonal sind Messinstrumente und Messprismen sowie Stative oder sonstige Instrumentenhalterungen mitzuführen und aufzubauen. Schon nach kurzer Zeit bedarf es einer kurzen Pause, um den Körper zu entlasten, was z. B. in einer Hockstellung erreicht werden kann, ein Vorgang, der sich je nach Haltungslänge der Vortriebsstrecke mehrfach wiederholt. Voraussetzungen für die Tunnelbegehung sind die Einhaltung der Vorschriften der DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG, DGUV (1997). Der §42 definiert die Mindestlichtmaße in Abhängigkeit von Durchmesser und Haltungslänge.

### 1.2 Motivation

In der vorliegenden Arbeit wird durch die Entwicklung automatisierter Messverfahren aufgezeigt, dass es Alternativen zu bisherigen Vortriebskontrollen beim Rohrvortrieb gibt. Die Alternativen führen zu einer Reduzierung von Messzeiten durch Änderungen im Messablauf gegenüber herkömmlichen Vermessungen im Tunnel.

Die Alternativen bestehen in der Entwicklung von drei neuen Messverfahren. In den ersten beiden Alternativverfahren finden die Anforderungen des Arbeits- und Gesundheitsschutzes Berücksichtigung. Die gesundheitlichen Einschränkungen werden beim Messpersonal minimiert, während im dritten Messverfahren die gesundheitlichen Gefährdungen durch den Einsatz eines autonomen Messroboters sogar eliminiert werden.

Das autonome Messverfahren soll helfen, den Automatisierungsgrad bei Vortriebsmaßnahmen zu erhöhen. Das führt zu Einsparungen bei den Personalkosten. In Bezug auf die stetigen Bemühungen der Bauwirtschaft, einen möglichst mannlosen Vortrieb zu realisieren, kommt dem Verfahren einer autonomen Vermessung große Bedeutung zu.

Die Entwicklung der automatisierten Messverfahren bezieht sich in erster Linie auf die Rohrvortriebstechnik, weil innerhalb des im nachfolgenden Kapitel 2 vorgestellten Projektes „Umbau des Emschersystems“ dieses Verfahren überwiegend zum Einsatz kommt. Auf die Tübbingbauweise, die im genannten Projekt ebenfalls Anwendung findet, können die Messverfahren auch übertragen werden.

### 2. Das Projekt „Umbau des Emschersystems“

Die Emscher entspringt in Dortmund-Holzwickede und fließt auf einer Länge von über 85 Kilometern westwärts über Recklinghausen, Gelsenkirchen, Bottrop und Oberhausen in Richtung Dinslaken, wo sie in den Rhein mündet. Bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts war sie wie ihre Nachbarflüsse Ruhr und Lippe ein ganz gewöhnlicher Fluss. Mit beginnender Industrialisierung, ausgelöst durch den Steinkohlenbergbau und der Stahlindustrie, verbunden mit einem enormen Bevölkerungszuwachs, verschlechterte sich der Zustand der Emscher durch die Einleitung der gewerblichen und häuslichen Abwässer (Abbildung 2.1).



Abb. 2.1: Das Emschergebiet um 1900, Archiv der EMSCHERGENOSSENSCHAFT

Bergsenkungen, die durch den unterirdischen Kohleabbau ausgelöst wurden, hatten zur Folge, dass die Gewässer im Emschergebiet nicht mehr frei abfließen konnten. Hochwässer überfluteten ganze Stadtteile. Demzufolge war die Ansteckungsgefahr durch Cholera, Thyphus und Malaria sehr groß.

Diesem Umstand wurde durch die Gründung der Emschergenossenschaft im Jahr 1899 begegnet. Ihre Aufgabe bestand im Wesentlichen darin, den Abfluss der Abwässer zu gewährleisten. In begradigten und betonierten offenen Bachtrassen wurde das Abwasser den Kläranlagen zugeführt. Deiche mussten auf Grund der Bergsenkungen zum Schutz der Bevölkerung gebaut und immer wieder höhenmäßig angepasst werden. Die Größenordnungen der Bergsenkungen haben Werte von bis zu 25 Metern und stellenweise darüber hinaus erreicht.

Erst durch die Nordwanderung des Bergbaus und dem damit einhergehenden Abklingen der Bergsenkungen konnten seit Anfang der 1990er Jahre Planungen ermöglicht werden, die zu einem flächendeckenden Umbau des Emschersystems von einem bis dahin offen angelegten Bachsystem hin zu einem unterirdischen Kanalnetz führen werden.

Das Gesamtnetz der offenen Abwasserkanäle beträgt ca. 400 Kilometer (Abbildung 2.2). Diese werden zu einem neuen Entwässerungssystem umgebaut, dessen Hauptschlagader der Abwasserkanal Emscher (AKE) zwischen Dortmund und Dinslaken wird.



Auf einer Länge von 51 Kilometern wird er die Abwässer von mehr als 1,8 Millionen Einwohnern den Kläranlagen zuleiten. Mit einem Gefälle von 1,5 Promille und in Tiefenlagen von 8 Metern in Dortmund beginnend, erreicht der Kanal in Dinslaken Tiefen von bis zu 40 Metern. Neu zu bauende Pumpwerke müssen zwischengeschaltet werden, um die Abwässer den Kläranlagen zuführen zu können. Ohne sie hätte der Kanal bei Dinslaken eine Tiefe von 75 Metern erreicht (EMSCHERGENOSSENSCHAFT 2014).

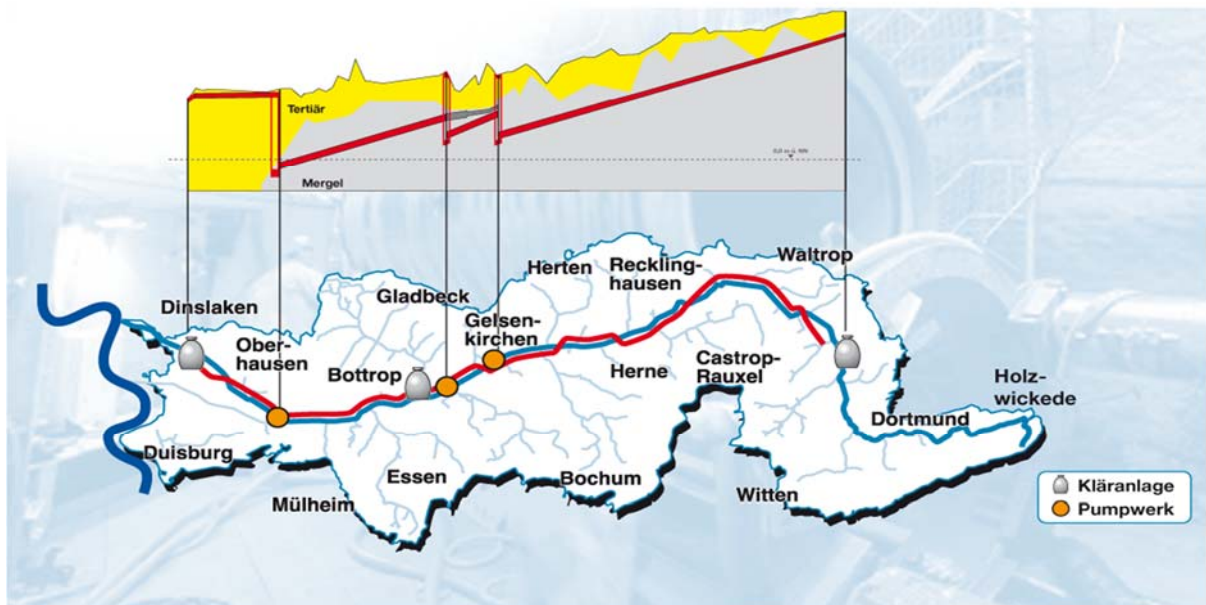


Abb. 2.2: Abwasserkanal Emscher von Dortmund nach Dinslaken im Gesamtnetz des Emschergebiets mit Nebenläufen (EMSCHERGENOSSENSCHAFT 2014)

Im April 2002 begann die Planung für den Abwasserkanal und den über 100 Schachtstandorten. Die Trassierung und die Wahl der Schachtstandorte hatten sich dabei an vielfältige Parameter zu richten. Um möglichst wenig Grunderwerb tätigen zu müssen, sollte der Kanal unter verbandseigenen Grundstücken verlaufen. Topographische Hindernisse wie Bahntrassen, Brückenbauwerke, Strommasten, sensible Werksgelände und geologisch kritische Bereiche mussten möglichst planerisch umgangen werden. Weiterhin mussten während der Planungsphase alle Faktoren zusammengetragen werden, die für die Dimensionierung des Kanals von Wichtigkeit waren. Dazu war die Kenntnis der Einwohnerzahlen unter Berücksichtigung der demographischen Bevölkerungsentwicklung, die Größen der offenen und versiegelten Flächen des Einzugsgebietes mit Kenntnis der Abwassermengen für die hydraulischen Berechnungen erforderlich.

Das Ergebnis der Planung in Bezug auf die Dimensionierung ergab, dass der neue Kanal mit unterschiedlichen Durchmessern zu bauen ist. Beginnend in Dortmund wird der Abwasserkanal, teilweise als Doppelrohr, auf einer Länge von ca. 30 Kilometern mit einem Durchmesser von DN1600 gebaut. Danach wird der Kanal mit DN1800 weitergeführt, um nach Dimensionswechsel über DN2000, 2200, 2400 mit DN2800 im Bereich von Bottrop seinen größten Durchmesser zu erreichen. Von Bottrop bis zum Pumpwerk Oberhausen entsteht ein Zweirohrkanal mit einem Durchmesser von je DN2600.

Die Haltungslängen belaufen sich entweder auf ca. 600m oder auf 1.200m. Der Ansatz, möglichst lange Kanalhaltungen zu bauen, liegt u. a. darin, dass die Anzahl der Schachtbauwerke gering sein sollte, da der Bau der Schächte sehr hohe Kosten verursacht.

Nach Beendigung der Umbauarbeiten werden die vom Abwasser befreiten ehemaligen offenen Kanäle zu ökologisch wertvollen Bachläufen (Abbildung 2.3) mit hohem Freizeitwert umgestaltet (EMSCHERGENOSSENSCHAFT 2014).

### Das Ziel – zukunftsfähige Wasserwirtschaft

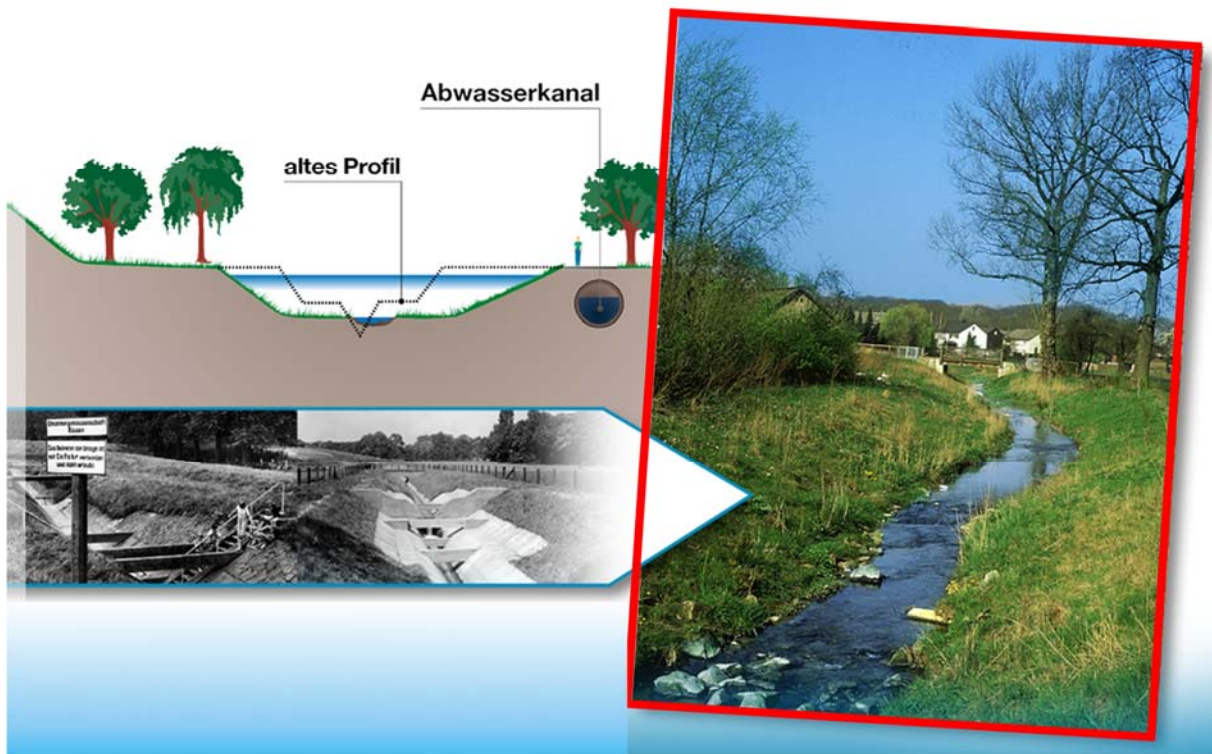


Abb. 2.3: Hoher Freizeitwert durch Renaturierung (EMSCHERGENOSSENSCHAFT 2014)

## 2.1 Wahl des Bauverfahrens

Für die Umsetzung des Projektes ist ein geeignetes Bauverfahren zu wählen. Der Planer oder Bauherr hat die Wahl zwischen einer Verlegung von Kanalhaltungen in offener Bauweise oder er entscheidet sich für das Vortriebsverfahren. Dabei wird zwischen dem Rohrvortriebsverfahren und dem Vortriebsverfahren in Tübbingbauweise unterschieden.

Welches Verfahren zum Einsatz kommt, hängt im Wesentlichen von den Parametern Tiefenlage des Kanals, Haltungslänge und Geologie ab. In nicht bindigen bis bindigen Böden wie Kies, Schotter, Mergel usw. und Tiefenlagen von 25m findet die Rohrvortriebstechnik Anwendung. Das ist im Projekt AKE im Bauabschnitt von Dortmund nach Bottrop der Fall.

In Bereichen, wo Fließsand, Schluff und Moorböden vorherrschend sind, ist ein Rohrvortrieb nicht geeignet. Die Böden können an der Ortsbrust nur unzureichend abgestützt werden. Zudem geben die Böden dem Rohrstrang nicht ausreichend Führung, was dazu führt, dass sich der Rohrstrang in seiner Lage verändern kann (SCHERLE 2003). Sandiger Boden würde beim Rohrvortrieb den Baukörper in kurzer Zeit wegen seiner Nachgiebigkeit umschließen bzw. den Ringspalt zusetzen. Der Ringspalt ist der Raum zwischen dem Baugrund und der Außenkante des Baukörpers. Ein umschlossenes Vortriebsrohr ließe sich damit nicht mehr in den Baugrund schieben lassen. Die Vortriebskräfte würden auch durch die Unterstützung von Zwischendehnerstationen (Abbildungen 5.6 und 5.7) nicht mehr ausreichen. Ziel beim Einbau der Rohre ist, den Vortrieb mit möglich geringstem Kraftaufwand durchzuführen. Die Reibungswiderstände werden in STEIN (2003) und SCHERLE (2003) differenziert beschrieben. Unterschieden werden die Reibungswiderstände auch zwischen geradlinigen und gekrümmten Linienführungen.

Auf Grund dieser geologischen Verhältnisse wird der Kanal von Bottrop nach Oberhausen in Tübbingbauweise erstellt. Von Oberhausen an wird das Abwasser in einem doppelzügigen Rechteckkanal dem Klärwerk Dinslaken zugeführt.

### 2.1.1 Offene Bauweise

Bei der offenen Bauweise wird zwischen dem Grabenverbau (Abbildung 2.4) und der geböschten Bauweise (Abbildung 2.5) unterschieden. In der Regel kommt in städtischen Bereichen mit dichter Bebauung der Grabenverbau zur Ausführung, schon allein wegen der beengten Verhältnisse im Straßenbereich. Die nachfolgenden beiden Abbildungen sollen einen schematischen Überblick geben.

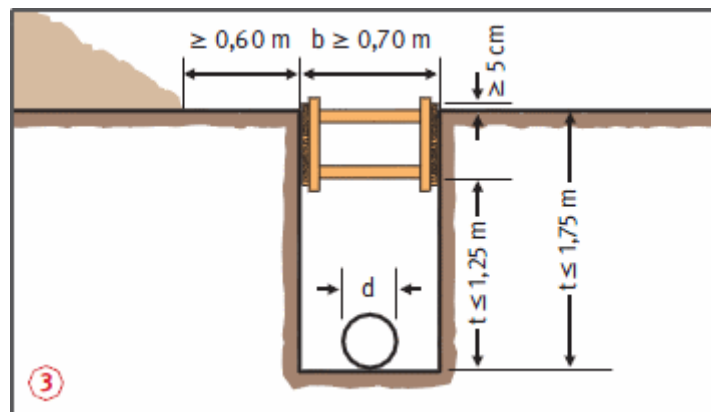


Abb. 2.4: Grabenverbau (BG BAU 2015)

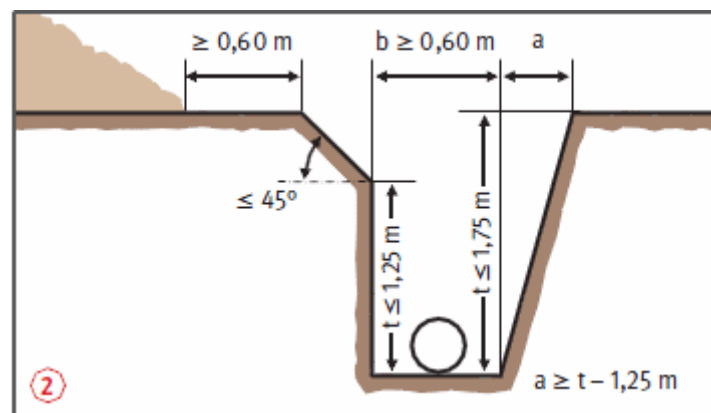


Abb. 2.5: Geböschter Graben (BG BAU 2015)

### 2.1.2 Rohrvortriebstechnik

Das technisch ausgereifte Rohrvortriebsverfahren ist ein seit Jahrzehnten wirtschaftliches Bauverfahren und findet im Emscherprojekt Anwendung. Gerade in Bereichen mit einer hohen Anzahl von zu querenden Verkehrsanlagen wie Bahngleisen, Autobahnen, Flüssen und Kanälen eignet sich das Vortriebsverfahren ebenso gut wie in Gebieten mit hohen Grundwasserständen. Der Platzbedarf und die Beeinträchtigungen während der Bauzeit sind gegenüber einer offenen Bauweise relativ gering. Der Verkehr wird nur an den Press- und Zielgruben gestört. Auf der Vortriebsstrecke treten nahezu keinerlei Beeinträchtigungen wie Baulärm durch Baustellenverkehr für die Anlieger auf. Beim Rohrvortrieb fallen weniger Ausgrabmassen gegenüber einer Kanalbauweise in offener Bauweise an (SCHAD ET AL. 2008).



## 2.1 Wahl des Bauverfahrens

Das Grundprinzip (Abbildung 2.6) beim Rohrvortrieb beruht darauf, dass eine vor dem ersten Betonrohr befindliche Tunnelvortriebsmaschine (TVM) mit Hilfe hydraulischer Hauptpressen, die sich in der Pressgrube (Abbildung 2.7) befinden, in den Untergrund vorgetrieben wird. Dehnerstationen, sogenannte Zwischenpressstationen, unterstützen den Vortrieb bei langen Haltungen. Der abzubauende Boden wird je nach Vortriebsverfahren in unterschiedliche Weise an der Ortsbrust gelöst und abtransportiert. Nach dem Einschieben des ersten Rohres werden die Pressen wieder in die Anfangsstellung gebracht, um Platz zu schaffen für ein nächstes Rohr. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis die Vortriebsmaschine den Zielschacht erreicht hat.

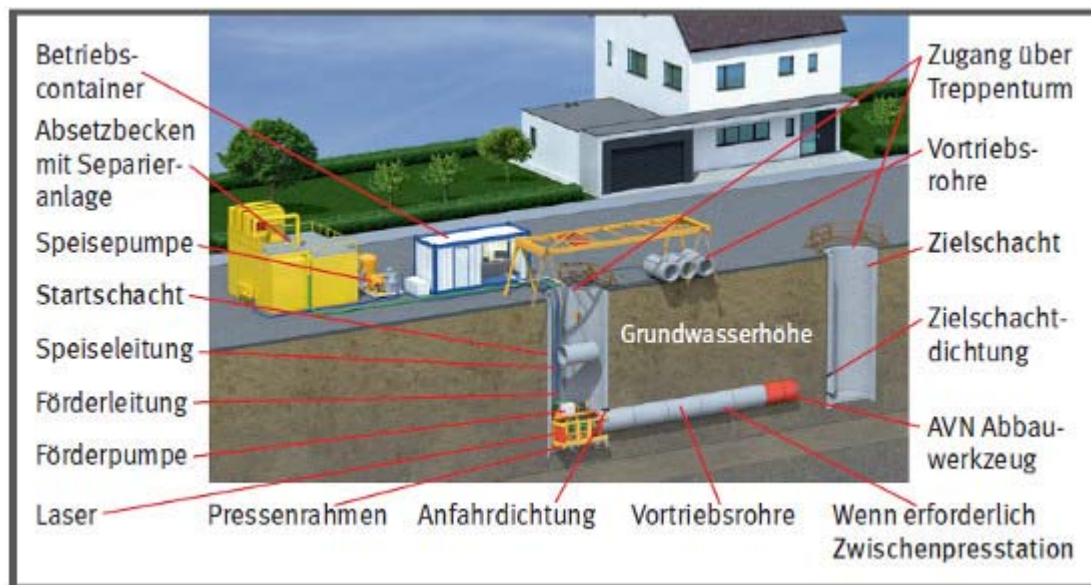


Abb. 2.6: Schematischer Querschnitt Rohrvortrieb (BG Bau 2015)



Abb. 2.7: Pressschächte ohne und mit Rohrpressen, Baustelle Emscher-Genossenschaft, Baufirma Epping

Der Abtransport des Bodens erfolgt hydraulisch (Abbildung 2.9) oder im Lorenbetrieb (Abbildung 2.10).

Beim Lorenvortrieb wird der Bodenaushub (Abbildung 2.8) über ein Förderband in die Lore befördert. Die Lore wird, ausgestattet mit einem Räderlaufwerk, über die Rohrsohle oder auf Gleisen mittels Stahlseil gezogen oder mit Hilfe einer Tunnellokomotive (Abbildung 2.11) zur Pressgrube gefahren. Die gefüllte Lore wird in der Pressgrube mittels Kran nach oben befördert und auf der Baustelle entleert. Anschließend steht die Lore wieder für die nächste Fahrt zur TVM zur Verfügung.

Beim hydraulischen Vortrieb wird der abgebaute Boden mit einer Bentonitsuspension in Förderleitungen zur Pressgrube gepumpt. Das Gemisch wird auf der Baustelle in einer

Separationsanlage wieder getrennt und in den Kreislauf zurückgeführt (HERRENKNECHT AG 2017a).



Abb. 2.8: Vortrieb mit offener Ortsbrust,  
Baustelle Emscherogenossenschaft,  
Baufirma Epping



Abb. 2.9: Hydraulischer Vortrieb DN1600,  
Baustelle Emscherogenossenschaft,  
Baufirma Wayss&Freytag



Abb. 2.10: Lore, Förderband,  
Emscherogenossenschaft,  
Baufirma Epping



Abb. 2.11: Tunnellokomotive,  
Emscherogenossenschaft,  
Baufirma Wayss&Freytag

### 2.1.3 Tübbingbauweise

Bei der Tübbingbauweise werden Betonfertigteile bzw. Einzelsegmente (Abbildung 2.12) durch den fertiggestellten Tunnelbereich (Abbildung 2.13) transportiert. Die Tunnelbohrmaschine hat zuvor das Erdreich gelöst und dem Förderband zugeführt. Sie stützt sich auf jeden neu eingebauten Tübbingring. Mit einem fernbedienbaren Kranarm, dem so genannten Erektor, werden die Tübbingsegmente zu einem Tübbingring zusammengesetzt. Im Anschluss daran wird der Ringspalt zur Stabilisierung verfüllt (MAIDL ET AL. 2011, HERRENKNECHT AG 2017b).

Im Unterschied zum Rohrvortriebsverfahren muss nicht der komplette Rohrstrang bewegt werden. Dadurch können auch wesentlich längere Tunnelstrecken gebaut werden. Ohne diese Technik könnten die im Kapitel 1 erwähnten Eisenbahntunnelprojekte nicht realisiert werden.



## 2.2 Auswahl der Tunnelvortriebsmaschine



Abb.2.12: Tübbinge vor Einbau  
Baustelle Emschergenossenschaft  
Baufirma Porr



Abb.2.13: Tübbingausbau AKE  
Baustelle Emschergenossenschaft  
Baufirma Porr

Der Ablauf der Kontrollvermessung in Tübbinghaltungen ist in Teilen anders als beim Rohrvortriebsverfahren. Hierbei sind alle Vermessungspunkte nur temporärer Art, da sich nach einer Vermessung der Rohrstrang wieder in Richtung Zielschacht weiterbewegt und sich alle bisherigen Messpunkte ebenfalls in ihrer Lage und Höhe verändern. Beim Tübbingausbau sind die Vermessungspunkte nach der Ringspaltverpressung fest. Daraus ergeben sich Unterschiede zur Rohrvortriebskontrollvermessung.

## 2.2 Auswahl der Tunnelvortriebsmaschine

Der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB 2010) hat Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen herausgegeben. Für die Entscheidung, welche TVM zum Einsatz kommen soll (Abbildung 2.16), wird den Ingenieuren, Bauherren und Planern in den Empfehlungen ein Prozessablauf in 7 Schritten an die Hand gegeben. Im weiteren Verlauf der Empfehlungen werden die Vortriebsmaschinen nach ihren jeweiligen Anwendungen aufgeführt.

Tunnelvortriebsmaschinen unterteilen sich in Voll- und Teilschnittmaschinen (Abbildungen 2.14 und 2.15). Bei einer Vollschnittmaschine wird der Boden über den gesamten Rohrquerschnitt abgebaut. Bei einer Teilschnittmaschine wird der Boden durch Abbauschaukeln durch horizontale und vertikale Bewegungen gelöst und abtransportiert.



Abb. 2.14: Vollschnittmaschine,  
Baustelle Emschergenossenschaft

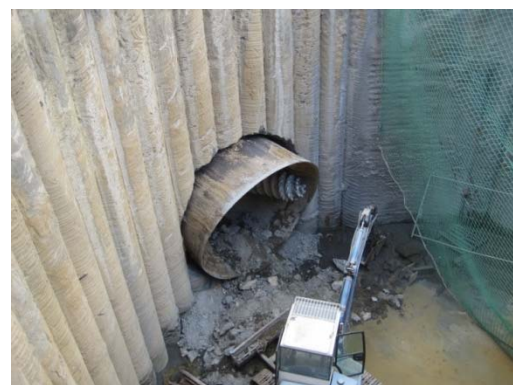


Abb. 2.15: Teilschnittmaschine,  
Baustelle Emschergenossenschaft

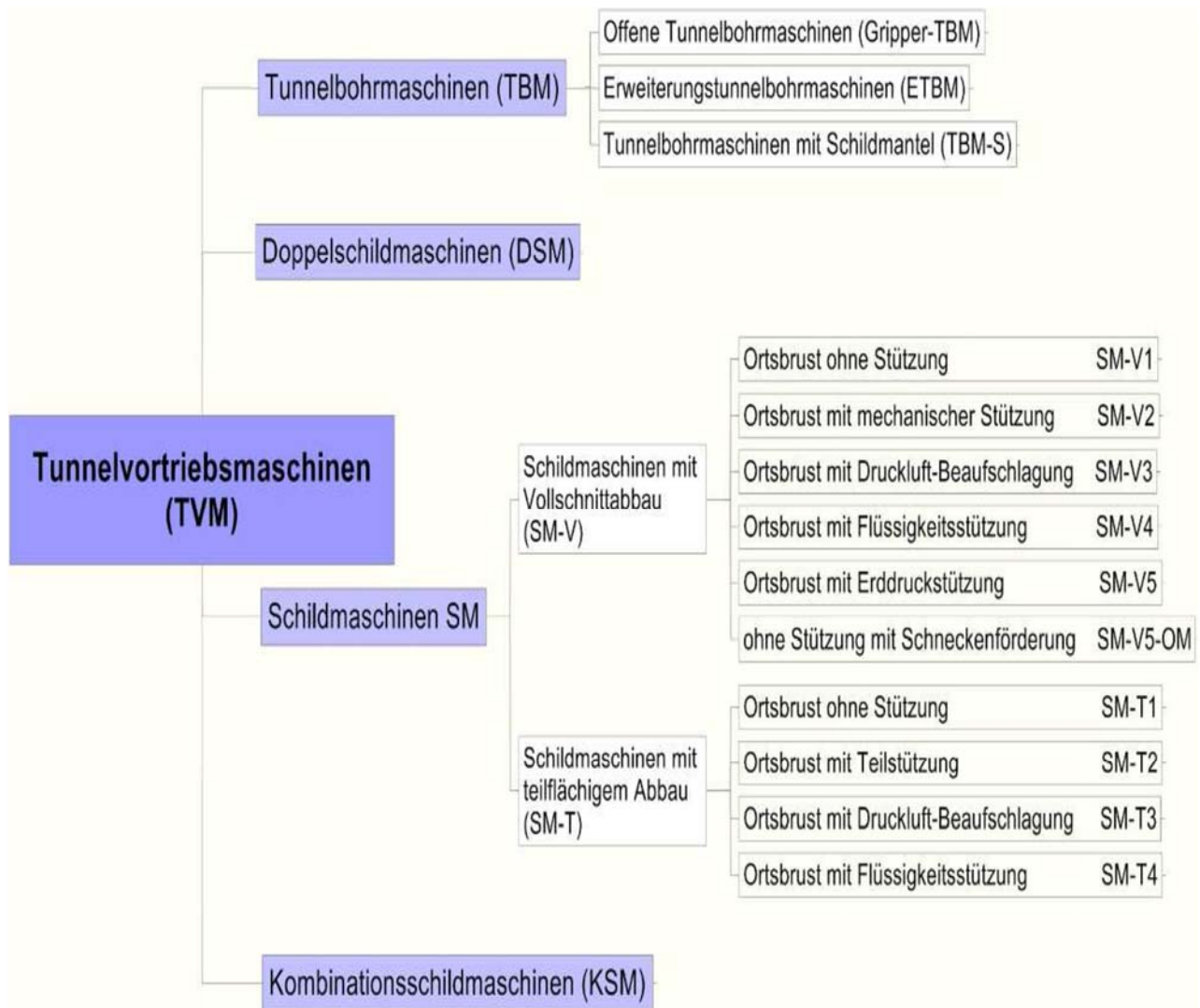


Abb. 2.16: Einteilung der Vortriebsmaschinen (DAUB 2010)

Für die richtige Wahl der TVM sind die Kenntnisse des Baugrundes von entscheidender Bedeutung. Für diese sind Bodenuntersuchungen durch Bohrungen durchzuführen, um kennen zu lernen, wie der Untergrund aufgebaut ist. Bei unterschiedlichen Bodenverhältnissen können sich erhebliche Vortriebswiderstände ergeben, welche zu einem hohen Verschleiß der Abbauwerkzeuge führen. Das hat Einfluss auf die Genauigkeit des Rohrvortriebes ebenso wie auf die Vortriebsleistung (PLACZEK ET AL. 2016).

Für das Emscherprojekt bedeutete das die Erkundung des Baugrundes auf der gesamten Trasse (Abbildung 2.2). Hierzu wurden über 1.500 Erkundungsbohrungen im Abstand von ca. 50m mit einer Gesamtböhrlänge von ca. 50.000 Metern durchgeführt. Um Kenntnisse über die Grundwasserstände zu erhalten, wurden auf der Trasse über 900 Grundwassermessstellen angelegt. Die Bohrungen hatten auch noch den Zweck, industrielle Altlasten und Kampfmittel des letzten Weltkrieges aufzuspüren. Der Vortrieb kann nur dann starten, wenn sichergestellt ist, dass alle Verdachtspunkte vom Kampfmittelräumdienst untersucht worden sind. Das gleiche gilt auch für den Bau der Press- und Zielgruben.

### 3. Ingenieurgeodäsie in Tunnelbauprojekten

Im Bauingenieurwesen, in der Architektur, in der Geologie und im Umweltbereich sind größere Ingenieurprojekte in der Regel nur in intensiver Zusammenarbeit mit der Ingenieurgeodäsie zu realisieren. Die Entwicklungen neuer Messtechniken und Messverfahren wie z. B. dem Laserscanning und Lasertracking sowie die Einbeziehung von Sensorsystemen haben die Aufgabenmöglichkeiten für den Geodäten erheblich erweitert.

Mit Hilfe moderner Messverfahren können die Hauptaufgaben der Ingenieurgeodäsie, die Bereitstellung geometrischer Informationen, erfüllt werden. Nutzer dieser Daten ist in Bauprojekten der Bauingenieur. Er benötigt die Informationen von der Planung bis zur Bauabnahme. Darüber hinaus gehören ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen in der Nutzungsphase von Bauobjekten im Verbund mit anderen Fachdisziplinen zu den weiteren Aufgaben von Vermessungsingenieuren. Demzufolge werden die ermittelten vermessungstechnischen Daten in allen Teilbereichen des Bauprozesses benötigt (MÖHLENBRINK und SCHWIEGER 2007).

BEETZ (2012) erklärt den Begriff Bauprozess als ein Ablauf zur Durchführung eines Bauprojektes. Das Bauprojekt kann neben einer Straße oder Brücke jedes andere Bauwerk sein. Er führt SCHWIEGER ET AL. (2010) an, die Bauprozesse im Allgemeinen, als auf einer Zeitachse sequentiell ablaufende Prozesse verstehen. Der Geodät versteht unter dem Bauprozess meist die Bauausführung, da er in dieser Phase hauptsächlich tätig ist. Aus Sicht des Bauingenieurs beginnt der Bauprozess jedoch deutlich früher. Er unterteilt den Bauprozess in „Definition, Bestandsaufnahme, Entwurf, Planung und Bauausführung“. MEYER (2003) stellt den Bauprozess in Bezug auf den Straßenbau ebenfalls in fünf Phasen dar, in der die Phase Projektplanung mit der Aufnahme von geographischen Daten beginnt. In der Konstruktionsphase finden die Trassenplanungen statt. Auf die Prozessphasen Bauplanung und Bauausführung folgt die Phase der Qualitätskontrolle, die u. a. die Dokumentation des Arbeitsergebnisses beinhaltet. BERNER ET AL. (2009) gehen von der folgenden Abfolge aus: Ausschreibung, Angebotsbearbeitung, Vergabe, Auftragserteilung, Projektstart, Anlaufphase, Bauphase, Fertigstellungsphase und Gewährleistungsphase. Diese auf neun Phasen erweiterte Möglichkeit der Bauprozessdarstellung wird für das Bauprojekt „Umbau des Emschersystems“ in der nachstehenden Abbildung 3.1 noch detaillierter dargestellt, um die Mitwirkung der Ingenieurgeodäsie innerhalb des Bauprozesses, in vorliegender Arbeit des Baus von Abwasserkanälen im Vortriebsverfahren, zu verdeutlichen. Die Prozessabfolge zeigt, wie die Vermessung immer wieder entscheidend mit dem Planungs- und Bauprozess verknüpft ist, auch wenn der zeitliche Anteil im Gesamtprojekt relativ gering ist.

In der Bauprozessdarstellung sind die Prozessteilschritte farblich unterschiedlich dargestellt. Die hellgrau kenntlich gemachten Teilprozesse beziehen sich auf alle Aufgaben und Arbeiten, die sich auf die Planung, dem Vertragswesen und auf die Bauausführung beziehen, während die Teilprozesse der ingenieurgeodätischen Aufgaben der Auftraggeber (AG) und Auftragnehmer (AN) farblich auf dunkelgrauem Hintergrund in der Bauprozessdarstellung aufgeführt sind.

Die Aufgaben der Vortriebskontrollen sind unter dem Begriff „Überwachung“ in grüner Farbe abgesetzt.



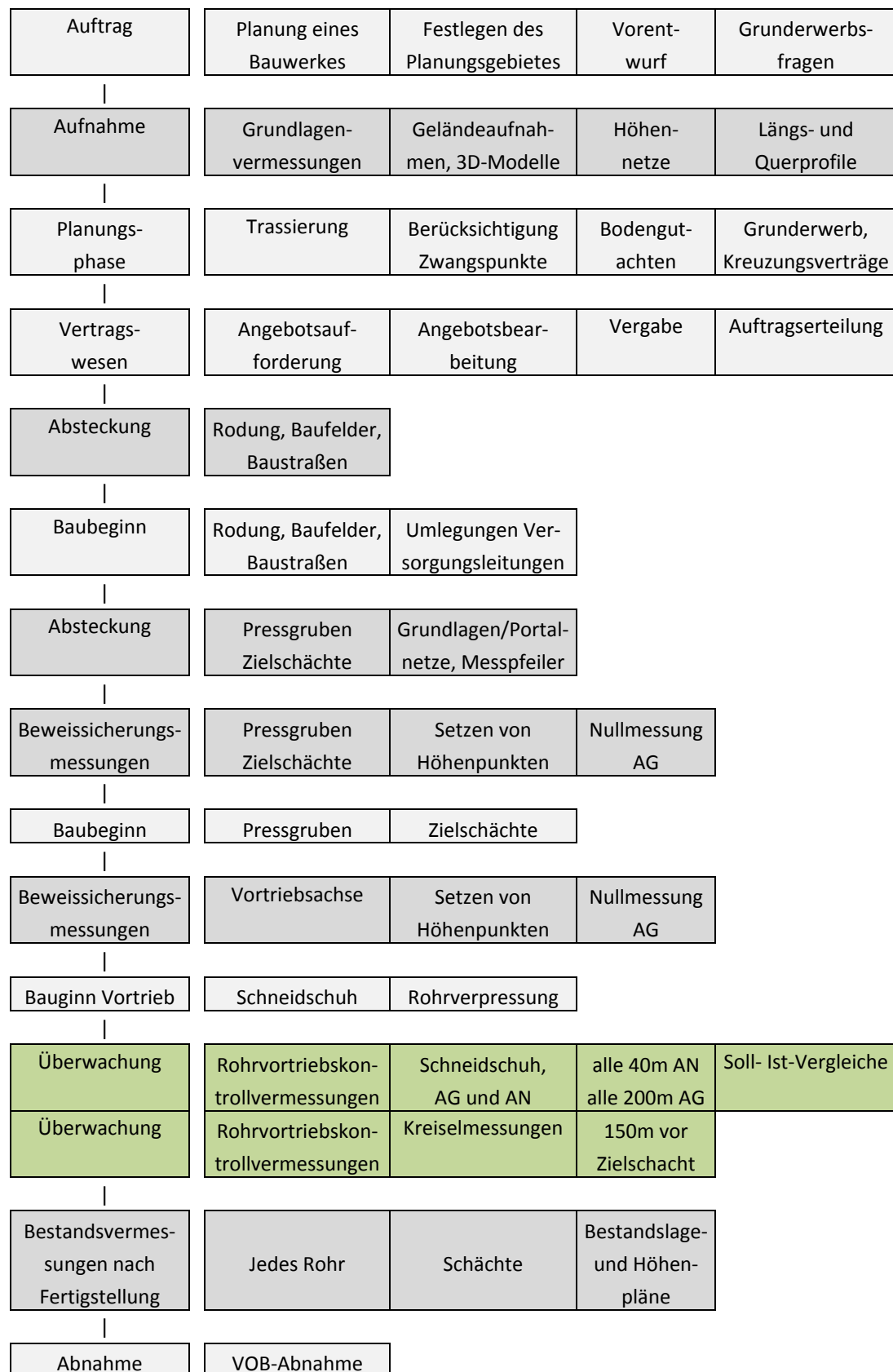


Abb. 3.1: Bauprozessdarstellung Abwasserkanal Emscher

### 3.1 Erstellung der Planungsgrundlagen für Tunnelbaumaßnahmen

Gemäß der vorstehenden Bauprozessdarstellung ist nach der Projektinitiierung ein Vorentwurf in einem festumrissenen Planungsgebiet zu erarbeiten, der auch erste Antworten auf grunderwerbliche Fragen einzubeziehen hat. Im ersten Schritt kann auf vorhandene Unterlagen wie z. B. amtliche Karten (Deutsche Grundkarte, Topographische Karten) zurückgegriffen werden. Für konkretere Planungen kann auf eine aktuelle Grundlage nicht verzichtet werden.

Mit der Bereitstellung von 3D-Geländemodellen (Abbildung 3.2), ergänzt durch Quer- und Längsprofile/Höhenpläne (Abbildungen 3.3 und 3.4) unterstützt die Ingenieurgeodäsie den begonnenen Planungsprozess.

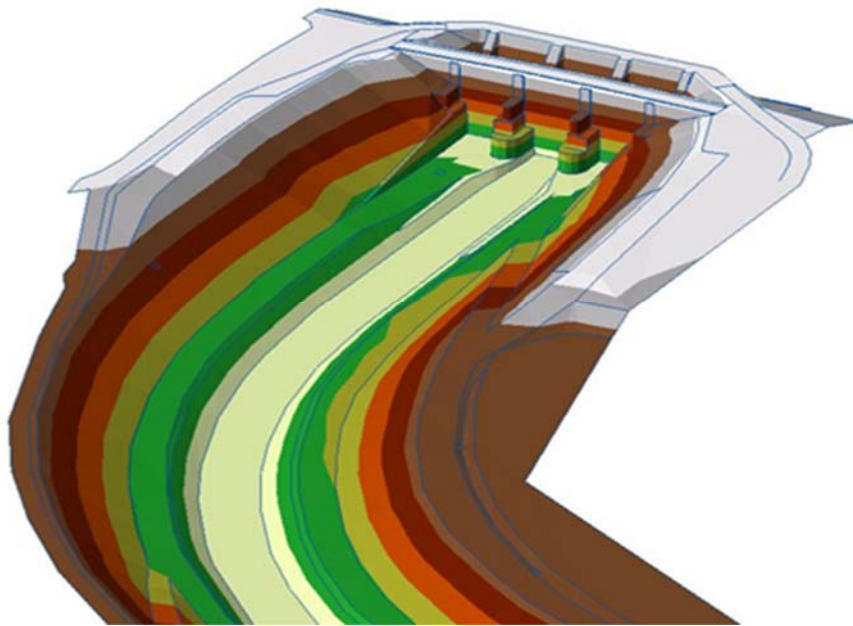


Abb. 3.2: Beispiel 3D-Modell EMSCHERGENOSSENSCHAFT

Für die Erstellung von Geländemodellen (Geländeaufnahmen) stehen mehrere Messverfahren zur Verfügung. Neben der klassischen Tachymeter- und GPS-Aufnahme werden zunehmend Geländemodelle mittels Airborne Laserscanning (ALS) erzeugt. Welches Verfahren zum Einsatz kommt, entscheiden die Projektparameter wie z. B. Größe, Aufgabenstellung und Detaillierungsgrad des aufzunehmenden Areal.

In kleinräumigen Gebieten werden in der Regel Tachymeteraufnahmen durchgeführt, die durch GPS-Messungen ergänzt werden können. Gleichzeitig können alle relevanten Infrastruktureinrichtungen wie Versorgungsleitungen, Kanalkataster mit Schachttiefen, Rohrdurchmessern usw. in einem Guss in die Modellbildung integriert werden.

Reine GPS-Messkampagnen können durchgeführt werden, wenn das Gelände ohne störende Vegetation ist und eine ausreichende Sichtfreiheit zu den Satelliten vorhanden ist.

Moderne Airborne Laserscan Aufnahmen (ALS) kommen dann zum Einsatz, wenn das aufzunehmende Messgebiet eine große Ausdehnung hat und wenn die Erreichbarkeit der aufzumessenden Flächen schwierig ist, wie z. B. bei großen Waldflächen. Besonders für hydraulische Berechnungen und der Ermittlung von Überflutungsflächen im Hochwasserfall ist das ALS ein passendes Messverfahren. Von Vorteil ist die hohe Durchdringungsfähigkeit in bewachsenen Arealen. Als Ergebnis erhält man ein Modell mit der Vegetation und Bebauung, DSM (Digital Surface Model) und/oder ein DTM (Digital Terrain Model) ohne Vegetation und Bebauung. Die Erfassung der Geländeoberfläche erfolgt entweder regelmäßig mit

einer Rasterweite von z. B. 0,5x0,5m oder 1x1m oder unregelmäßig. Eine unregelmäßige Verteilung der Messpunkte erfasst die Neigungen und Bruchkanten im Gelände besser. Das ist auch abhängig von der Punktdichte. Diese richtet sich nach den Anforderungen des Auftraggebers bzw. ergeben sich aus dem Projekt selber. Punktdichten von 20 und mehr Punkten pro m<sup>2</sup> ermöglichen eine gute Erfassung von Verkehrseinrichtungen, Gräben, Deichen und sonstigen Strukturelementen und damit eine kleinstrukturierte Darstellung der Geländesituation. Horizontal- und Vertikalgenauigkeiten der Laserdaten von  $\pm 5\text{cm}$  ( $1\sigma$ ) für XYZ hängen u. a. von guten Satellitenkonstellationen und genauen Referenzvermessungen mittels klassischer Passpunkte im Aufnahmegebiet ab. Die Erstellung von 3D-Modellen mittels ALS werden in Projekten der Emscher-genossenschaft mit den vorgenannten Genauigkeiten beauftragt.

Bei einer tachymetrischen Geländeaufnahme können die Geländepunkte z. B. mit den in Kapitel 7 angegebenen Tachymeterwinkelmessgenauigkeiten gemessen werden. Bei den normalen Geländepunkten ist weniger die Tachymetergenauigkeit entscheidend. Vielmehr steht die Aufhaltegenauigkeit bzw. die Eindringtiefe des Prismenstabes bei der Vermessung der einzelnen Geländepunkte im Vordergrund. Je nach Festigkeit des Bodens dringt ein Messstab mal mehr und mal weniger tief in den Boden ein, was auch abhängig von demjenigen ist, der den Geländepunkt erfasst. Erfahrungsgemäß differieren die Geländehöhen um ca. einen halben Dezimeter gegenüber nicht festen Untergründen.

Die Lage- und Höhengenaugigkeiten liegen bei der GPS-Aufnahme für Lagepunkte bei ca. 1-2 cm und bei der Höhe bei ca. 2-3 cm vor. Die Aufhaltegenauigkeit ist hierbei nicht inbegriffen. Aus den Geländemodellen werden für planerische Zwecke Quer- und Längsprofile generiert. In Querprofilen (Abbildung 3.3) wird das Gelände maßstäblich und radial zu der Trassenachse als vertikale Fläche dargestellt.

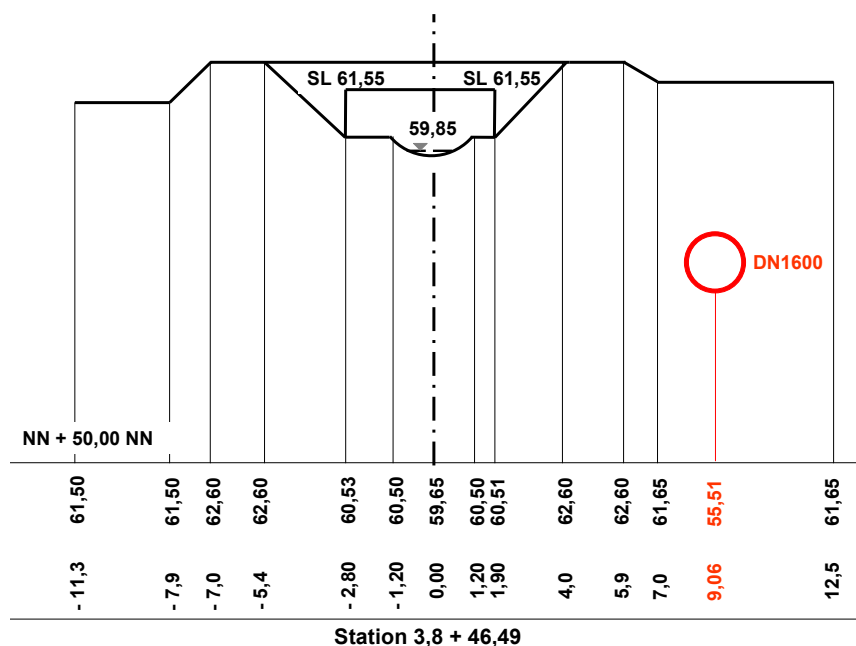


Abb. 3.3: Beispiel Querprofil, Emscher-genossenschaft

In Längenschnitten bzw. Längsprofilen werden Gradienten entlang der Trassierungsachse meist überhöht dargestellt. Dabei haben die Achsstationen einen anderen Maßstab als die Höhen. Mehrere gleichzeitig darzustellende Gradienten, wie Sohllinie, Bermlinien, Deichoberkanten und Geländelinien sowohl für die rechte wie für die linke Bachseite bilden in Projekten der Emscher-genossenschaft einen Höhenplan (Abbildung 3.4).

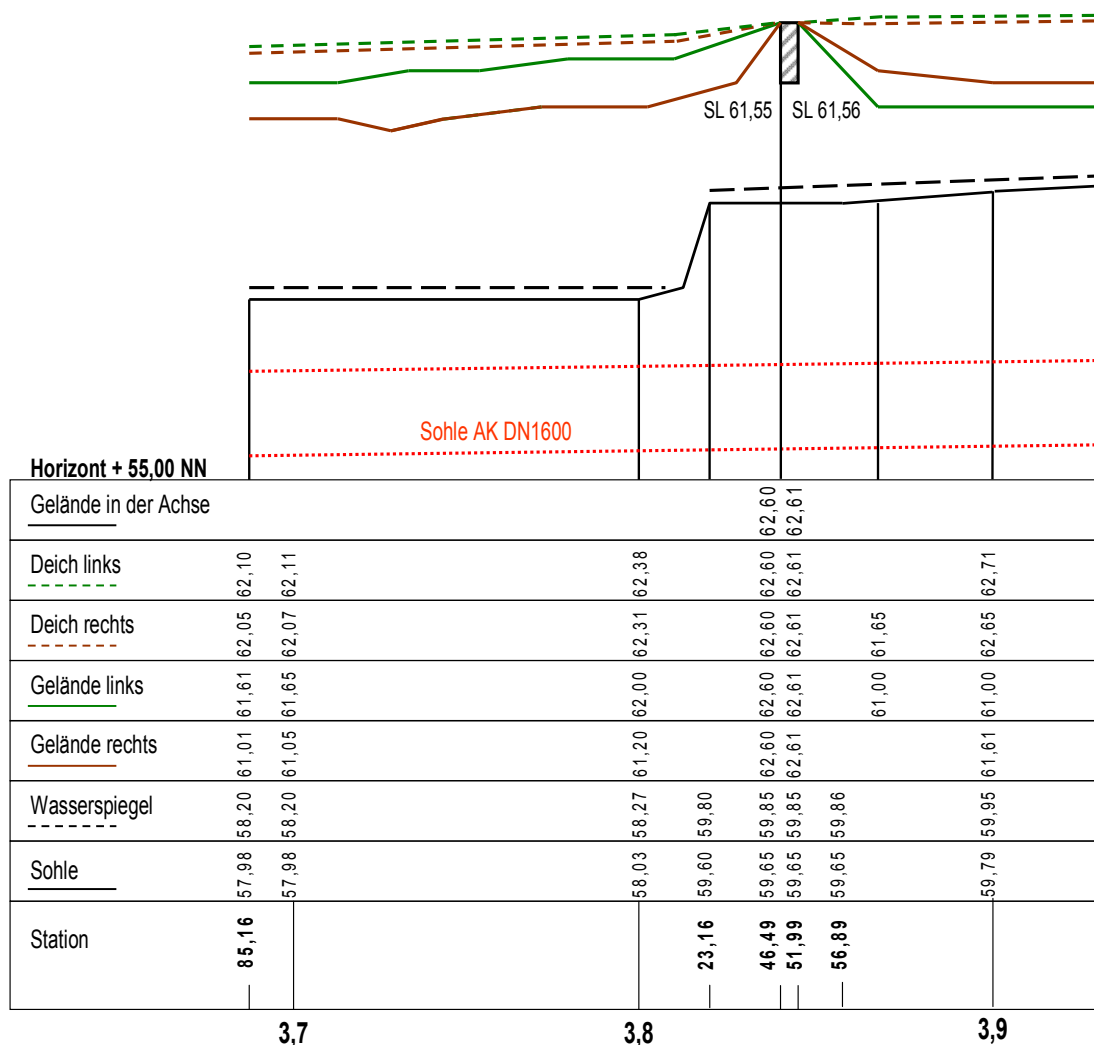


Abb. 3.4: Beispiel Höhenplan, Emschergenossenschaft

Mit den geometrischen Informationen beginnt die Hauptplanungsphase. Die Trassierung der Tunnelachse und die Festlegung der Schachtstandorte erfolgt unter Berücksichtigung von Zwangspunkten auf Basis von rechtwinkligen Koordinaten und NN-Höhen.

### 3.2 Amtliche Lage- und Höhensysteme

Die rechtwinkligen Koordinaten und NN-Höhen sind Bestandteil von Lage- und Höhensystemen, in denen alle Vermessungsarbeiten durchgeführt werden. Die im Kapitel 2 beschriebenen Bergbauaktivitäten haben nicht nur die Lebenssituation der Bevölkerung beeinflusst, sondern auch Veränderungen auf das Jahrhunderte alte Katastersystem hervorgerufen, was zu Lage- und Höhenverschiebungen in einer Größenordnung geführt hat, die nicht unberücksichtigt bei der Übertragung der Planungsdaten in die Örtlichkeit bleiben dürfen.

Die amtlichen Lage- und Höhensysteme werden im Folgenden zunächst im Allgemeinen vorgestellt. Im Anschluss daran wird aufgezeigt, wie die Koordinaten- und Höhenveränderungen im Projekt Abwasserkanal Emscher Berücksichtigung finden.

### 3.2.1 Amtliche Lagesysteme

Das Gradnetz mit Breiten- und Längengraden für die Darstellung von Teilen der Erdoberfläche beruht auf geographischen Koordinaten. Die gekrümmte Erdoberfläche kann in einer Kartenebene nicht ohne Verzerrungen abgebildet werden. Mathematische Ähnlichkeit oder Kongruenz kann nicht erreicht werden, sollte aber möglichst genähert umgesetzt werden. Geeignete Verfahren haben Soldner und Gauß entwickelt (KAHMEN 1993).

Die Königlich Preußische Landesaufnahme aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts war Grundlage für den amtlichen Lagebezug in Nordrhein-Westfalen. Die Lagefestpunkte wurden auf Basis von Winkelmessungen unter Einbeziehung von einigen Basislinien bestimmt. Mit der elektronischen Streckenmessung war es zu Beginn der siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts möglich, die Strecken zwischen den für das Lagefestpunktfeld benötigten Trigonometrischen Punkten (TP) in Verbindung mit den gemessenen Winkeln neu zu bestimmen. Ein einheitliches Vorgehen der Vermessungsverwaltungen bzw. eine bundesweite Netzerneuerung ist nicht zu Stande gekommen, so dass die Netzerneuerungen der Bundesländer zeitlich unterschiedlich realisiert wurden (IRSEN 2006).

Aus dem Lagefestpunktfeld der TP heraus wurden Verdichtungsmessungen durchgeführt, um im kleinräumigen Bereich für Vermessungsarbeiten wie Grenzvermessungen, topographische Aufnahmen, Absteckungen usw. über eine ausreichende Anzahl von amtlichen Messpunkten verfügen zu können.

Seit 1927 verwenden die deutschen Landesvermessungsämter das Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Gauß hat keine zusammenhängende Darstellung seiner Abbildungsverfahren hinterlassen. Diese wurde durch Krüger vervollständigt. Ihm zu Ehren wurden die Gaußschen Koordinaten als Gauß-Krüger-Koordinaten benannt (KAHMEN 1986).

Das Gitternetz der geographischen Koordinaten wird in  $3^\circ$  breite Meridianstreifen aufgeteilt. Jeder Meridianstreifen ist ein Koordinatensystem für sich. Der Meridianstreifen wird auf einen Zylindermantel, dessen Achse in der Äquatorebene liegt und der folglich die Erde an den Mittelmeridianen berührt (Abbildung 3.5).

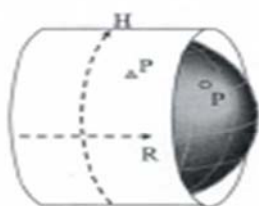


Abb. 3.5: Berührzylinder der Gauß-Krüger-Abbildung  
(RESNIK und BILL 2000)

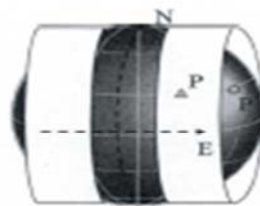


Abb. 3.6: Schnitzzylinder der UTM-Abbildung  
(RESNIK und BILL 2000)

Unterschiedliche Interessen der einzelnen europäischen Staaten haben dazu geführt, ihre jeweiligen Bezugs- und Abbildungssysteme für ihre Zwecke zuzuschneiden. Dabei wurden die Möglichkeiten einer grenzübergreifenden Zusammenführung der Geodaten lange Zeit nicht berücksichtigt. Die Entwicklung des weltweit zur Verfügung stehenden Global Positioning System (GPS), insbesondere aber die Forderungen nach grenzüberschreitenden Navigationssystemen haben seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts dazu geführt, ein europaweites einheitliches Bezugssystem zu schaffen. Gleichzeitig machten der europäische Zusammenschluss und die Wiedervereinigung der Bundesrepublik Deutschland

(BRD) mit der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) eine Vereinheitlichung auf dem Gebiet der Geodäsie nötig.

Im Jahr 1989 wurde eine erste GPS-Beobertungskampagne der europäischen Vermessungsverwaltungen durchgeführt mit dem Ziel, ein einheitliches europaweites Bezugssystem zu schaffen, die Grundlage für das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989, ETRS89 (IRSEN 2006).

Die mit diesem ETRS89 verbundene Universal Transverse Mercator-Projektion (UTM) ist eine winkeltreue Abbildung und vergleichbar mit der Gauß-Krüger-Abbildung. Die jetzt 6° breiten Streifen (60 Streifen für die gesamte Erde) decken einen wesentlich größeren Bereich auf einem Streifen ab und bilden wie im Gauß-Krüger-System ein eigenes Koordinatensystem. Um die Streckenverzerrungen am Rand der Streifen gering zu halten, wird ein Schnitzzylinder verwendet, der im Abstand von 180 km vom Mittelmeridian entfernt zwei längentreue Durchdringungskreise bildet (Abbildung 3.6). Der Mittelmeridian wird mit dem Verjüngungsfaktor 0,9996 projiziert. Die Korrekturen für die Längenverzerrung finden automatisch Berücksichtigung bei den Vermessungen in den heutigen modernen Messinstrumenten.

### 3.2.2 Amtliche Höhensysteme

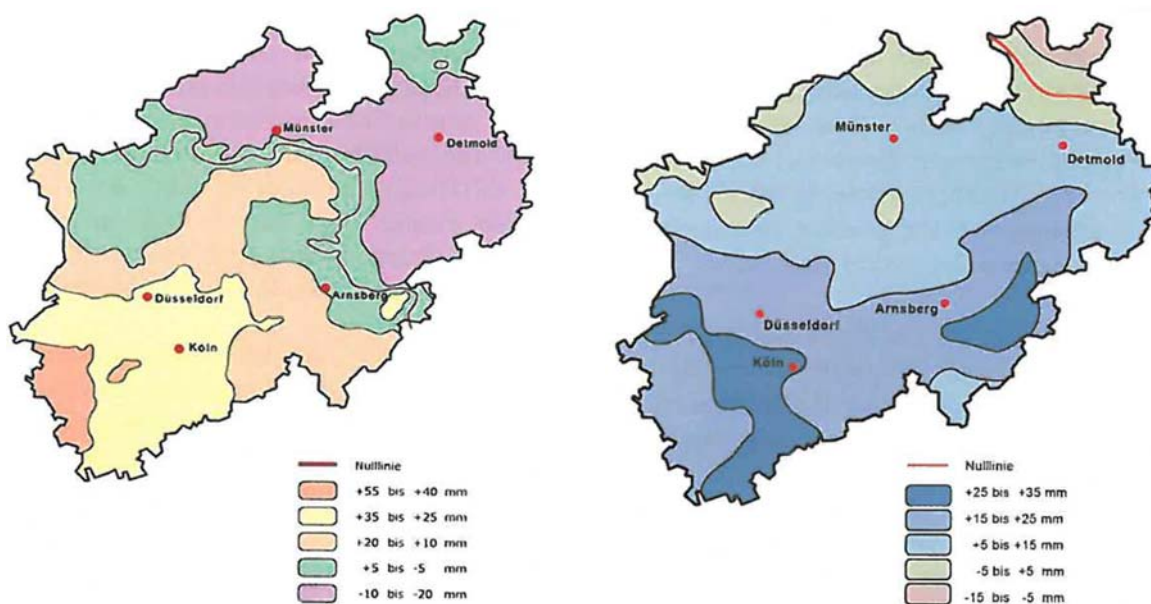
Höhenmessungen wurden in Preußen im 19. Jahrhundert zunächst zweckgebunden an jeweils separaten Nullpunkten angeschlossen. Die verschiedenen Höhensysteme konnten folglich nicht miteinander verbunden werden. Die Vielzahl der Bezugsebenen wurde mit dem Beschluss des Zentralkdirektoriums des preußischen Staates beseitigt, indem die Höhen, die als Höhen über Normal Null (NN) bezeichnet werden, einheitlich auf den Nullpunkt des Amsterdamer Pegels (Normalhöhenpunkt von 1879) bezogen wurden. Bis zum Jahr 1894 wurde das erste weitmaschige Höhennetz gemessen, welches im Jahre 1912 (Deutsches Haupthöhennetz 1912, DHHN12) erneuert wurde. Die NN-Höhen haben den Höhenstatus 100. Mit einer Höhenstatuszahl unterscheidet man die amtlichen Höhen in verschiedenen Höhensystemen.

Mit dem DHHN85 haben die (alten) Bundesländer nach einheitlichen Kriterien eine Neuvermessung in der Zeit von 1980 bis 1986 durchgeführt. Die Wiedervereinigung der BRD mit der DDR hat dazu geführt, dass das in der DDR erneuerte Höhennetz mit dem Haupthöhennetz der BRD durch Verbindungsmessungen in einer Gesamtausgleichung zum Deutschen Haupthöhennetz 1992 (DHHN92) vereinigt wurde (IRSEN 2006).

Mit Einführung der Satellitenvermessung konnten auch die unterschiedlichen Höhensysteme vereinheitlicht werden. Die Umstellung der NN-Höhen auf NHN (Normalhöhenull) erfolgte in NRW am 1.1.2002.

Die Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen hat am 21.09.2016 beschlossen, einen neuen Raumbezug einzuführen, das DHHN2016 mit dem Höhenstatus 170. Die Höhenwertveränderungen in NRW beim Übergang der NN-Höhen DHHN12 zum DHHN92 werden in der Abbildung 3.7 (linkes Bild) dargestellt. Im rechten Bild der Abbildung sind die Höhenwertveränderungen vom DHHN92 zum DHHN2016 aufgeführt. In der Darstellung sind die Auswirkungen des Bergbaus in NRW, Kapitel 3.3.2, nicht inbegriffen. Die Differenzen nehmen dadurch wesentlich größere Höhenwertveränderungen an. Die Überführung der vorherigen Höhen in das DHHN2016 geschieht durch die webbasierte Anwendung von „HOETRA2016“. KRICKEL ET AL. (2016) beschreiben detailliert die Auswirkungen des neuen Raumbezuges.





NHN-Höhen im DHHN92 – NN-Höhen im DHHN12

NHN-Höhen im DHHN2016 – NHN-Höhen im DHHN92

Abb. 3.7: Höhenwertänderungen (KRICKEL ET AL. 2016)

Alle Höhenmessungen benötigen zur eindeutigen Definition eine Höhenbezugsfläche (Abbildung 3.8). Ohne Kenntnis von Höhenbezugsflächen kann kein Punkt auf der Erde definiert werden. Um diesen auf der Erdoberfläche eindeutig festlegen zu können, wird die unregelmäßige mathematisch nicht erfassbare Erde annähernd durch ein Ellipsoid mit Achsenparameter beschrieben und über die Festlegung von Festpunktkoordinaten in seiner Lage zur Erdoberfläche bestimmt. Für Lagemessungen kann das Ellipsoid als Bezugsfläche genutzt werden, für Höhenmessungen ist das Ellipsoid nicht geeignet, da die Schwerkraft die Messergebnisse beeinflusst. Eine Niveaulfläche, die in allen ihren Punkten senkrecht zur Richtung der Schwerkraft geschnitten wird, ist das Geoid (DE LANGE 2013). Es ist als eine in Ruhe befindliche Ozeanoberfläche fassbar, die man sich unter den Kontinenten in Form von kommunizierenden Röhren fortgesetzt vorstellen muss (WITTE und SCHMIDT 2000). Bei der Ableitung von Niveaulflächen spielen u. a. die Meeresflächentopographie und die Meerespiegelanomalien eine wichtige Rolle. Weiterhin führt DE LANGE (2013) aus, dass das Geoid fast nur von theoretischem Interesse ist, zumindest in der Deutschen Landesvermessung. Den Anforderungen hochgenauer Höhenmessungen genügt es nicht. Es kann nicht in jedem Punkt der Erde genau definiert werden. Das Quasigeoid als rechentechnische Größe entspricht dem geglätteten Geoid. Der Abstand zwischen Ellipsoid und Quasigeoid wird mit Quasigeoidundulation bezeichnet und ist berechenbar. Daraus resultieren Beziehungen zu den ellipsoidischen Höhen. Die NHN-Fläche entspricht dem Quasigeoid als Höhenbezugsfläche. Ausführlich beschreibt TORGE (2003) die Zusammenhänge.

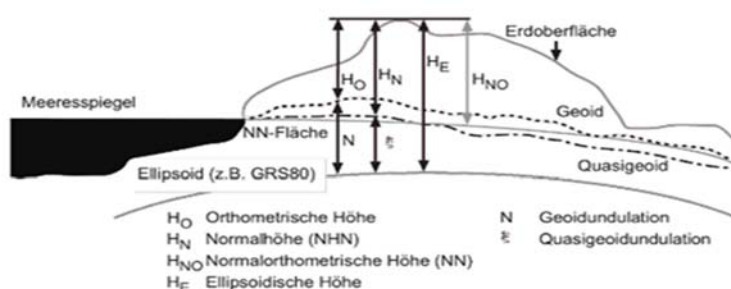


Abb. 3.8: Höhensysteme und Höhenbezugsflächen (DE LANGE 2013)

### 3.3 Lage- und Höhensysteme im Emschergebiet

#### 3.3.1 Kommunalisierung der Katasterverwaltungen

Die Kommunalisierung der Katasterverwaltungen vom 1.11.1948 in NRW hat dazu geführt, dass die einzelnen Städte, Kreise und Kommunen ihr eigenes auf ihr Stadtgebiet begrenztes Koordinatensystem geschaffen haben. Durch den unterschiedlichen Aktualisierungsgrad liegen die Gauß-Krüger-Koordinaten in verschiedenen Lagestatus (LST) vor. Wenn mehrere Lagekoordinatenpaare für denselben Vermessungspunkt geführt werden, erhalten sie verschiedene Lagestatusangaben. Der Lagestatus unterscheidet die unterschiedlichen Lagekoordinaten im amtlichen Vermessungswesen.

In Gelsenkirchen wurden z. B. die Katasterkarten von einzelnen Stadtgebieten ohne Anschluss an das übergeordnete trigonometrische Netz erstellt. Darüber hinaus entstanden die Grundlagen für die Koordinatenbestimmung in unterschiedlicher Güte. Mit der Netzbestimmung Ruhrgebiet 1950/58 auf Grund der Bergbauaktivitäten wurden die Koordinaten der vorherigen trigonometrischen Punkte ersetzt. Das Netz wurde durch Triangulation neu bestimmt. Angeschlossen wurden die Messungen an vermutlich unbewegten Punkten. FRIEDL und LACH (2008) führen weiter aus, dass durch die Auswirkungen des Bergbaus (nachfolgendes Kapitel) Systematiken von Bodenbewegungen nicht mehr klar erkennbar sind und dass eine Abgrenzung von Gebieten mit einheitlicher Lageänderung nicht möglich ist. Der Lagestatus ergibt sich für Gelsenkirchen zu 158 (die erste Ziffer beschreibt die Koordinatenart, 1=GK-Koordinatensystem, die zweite die Jahrgangszahl der Entstehung).

#### 3.3.2. Steinkohlenabbau im Ruhr- und Emschergebiet

Im Laufe der Industrialisierung des Ruhrgebietes fand auch im Einzugsgebiet der Emscher Steinkohlenabbau statt. Vorher hat hier, wie im Ruhrtal, örtlicher oberflächiger Abbau im süd- und östlichen Bereich stattgefunden.

Die Emscher selber ist, wie erwähnt, seit Mitte der 1850er Jahre durch bergbaubedingte Senkungen vorflutgestört. Maximale Senkungen gab es in Dortmund-Deusen mit rd. 27 m (Abbildung 3.9). Senkungen treten nicht punktuell auf, sondern flächig mit auslaufenden Setzungen zur sogenannten Nulllinie.

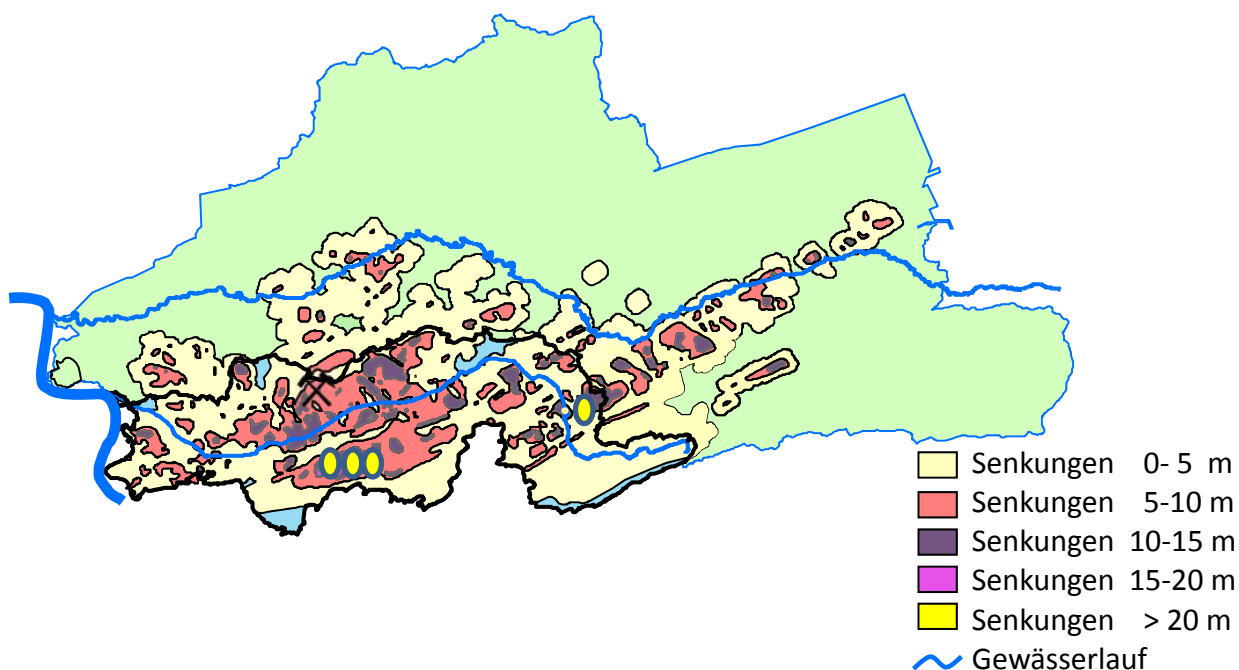


Abb. 3.9: Senkungen in den Einzugsgebieten der Emscher genossenschaft und des Lippeverbandes seit Beginn des Steinkohlenbergbaus



### 3.3 Lage- und Höhensysteme im Emschergebiet

Seit den 1920er Jahren werden die Senkungen an den Bachläufen der Emschergerossenschaft per Nivellement ermittelt. Die Ergebnisse werden in Höhenbüchern geführt, anfänglich in analoger Form und seit der Einführung von MS-Excel digital mit gleichzeitiger Ergebnisdarstellung in Diagrammen. Die Bergsenkungen sind seit Beginn der neunziger Jahre größtenteils abgeklungen. Eine Beobachtung der Bodenbewegungen hat aber weiter zu erfolgen. Der Bergbau wird in Zukunft das Grubenwasser ansteigen lassen. Die möglichen Hebungen können entweder klassisch durch Nivellements oder mit modernen Verfahren wie z. B. der Satellitenradarinterferometrie ermittelt werden.

Das seit Jahrzehnten gepflegte linienhafte Sonderhöhenetz (linienhaft auf Grund der lang gestreckten Bachsysteme) wird zwecks Aktualisierung und Abgleich an das Leitnivellement angeschlossen.

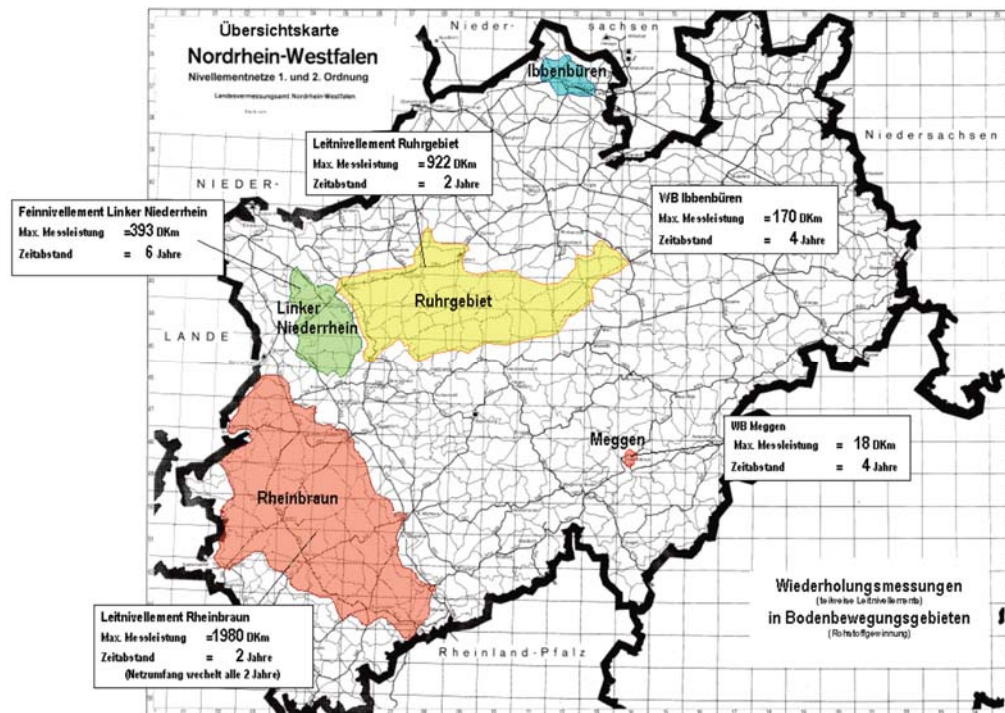


Abb. 3.10: Leitnivellementsgebiete in Nordrhein-Westfalen (BOJE ET AL. 2008)

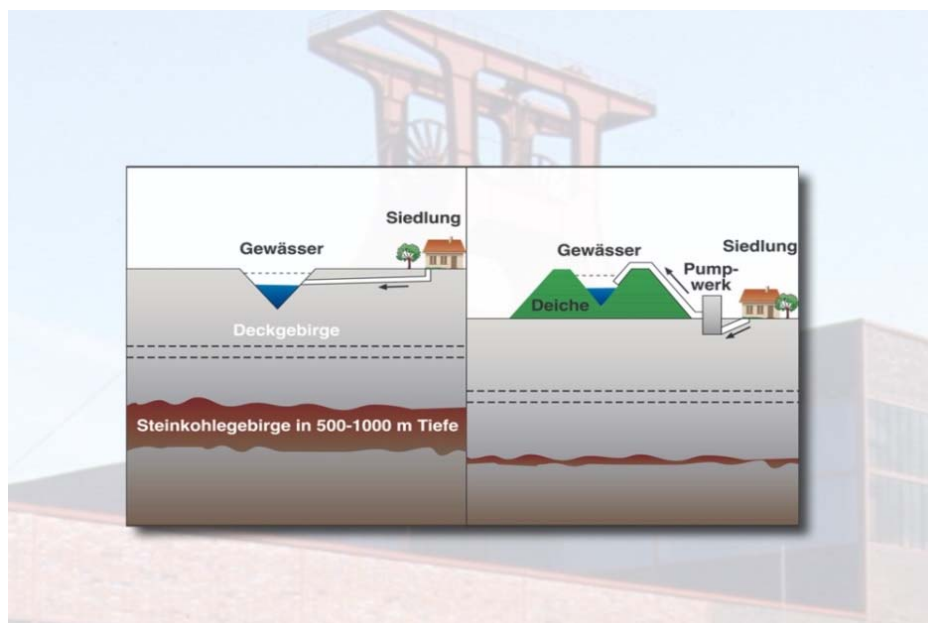


Abb. 3.11: Auswirkungen des Bergbaus auf das Gelände vor und nach dem Abbau

Das Diagramm zeigt einen Querschnitt durch einen Senkungstrog. Die Schichten sind von oben nach unten: Erdoberfläche, Gebirgsschichten und ein Flöz. Die Gebirgsschichten sind in Schieferung (Schieflage) unterteilt, mit 'max. Schieferung' an den Rändern und 'Pressung' in der Mitte. Die Flözschicht ist als 'Flöz' beschriftet. Die Senkungstrog ist als 'Senkungstrog' bezeichnet, mit 'Zerrung' an den Rändern. Die Flözschicht ist als 'A b b a u' bezeichnet.

Die Gebirgsschichten über dem Abbaufeld in Abbildung 3.12 unterteilen sich in a = Bruchzone, b = Bruchverformung und c = bruchlose Durchbiegung. Durch den Grenzwinkel  $\gamma$  wird die Nulllinie festgelegt. Bei einer plattenförmigen Durchbiegung wird die Erdoberfläche in der Mitte gepresst und im Randbereich gedehnt. Die Punktabstände von Messpunkten werden dementsprechend verkürzt bzw. verlängert.

- 22 -



Abb. 3.13: Querschnitt durch einen gemessenen Senkungstrog über einem Abbau (KRATZSCH 2008)

#### 3.3.3. Auswirkungen der Setzungsproblematik in den Emscherprojekten

Entlang der Emscher befinden sich alle 100m auf der rechten und linken Flussseite im Deich- und Einschnittsbereich jeweils Festpunktsteine. Auf dem Stadtgebiet von Gelsenkirchen weisen die Koordinaten der Festpunkte, die in der Örtlichkeit natürlich nur einmal existieren, Differenzen auf Grund der Bergbauaktivitäten und den Unterschieden in der zeitlichen Netzneubestimmung durch die benachbarten Katasterämter in einer Größenordnung von einem Meter auf (Abbildung 3.14).

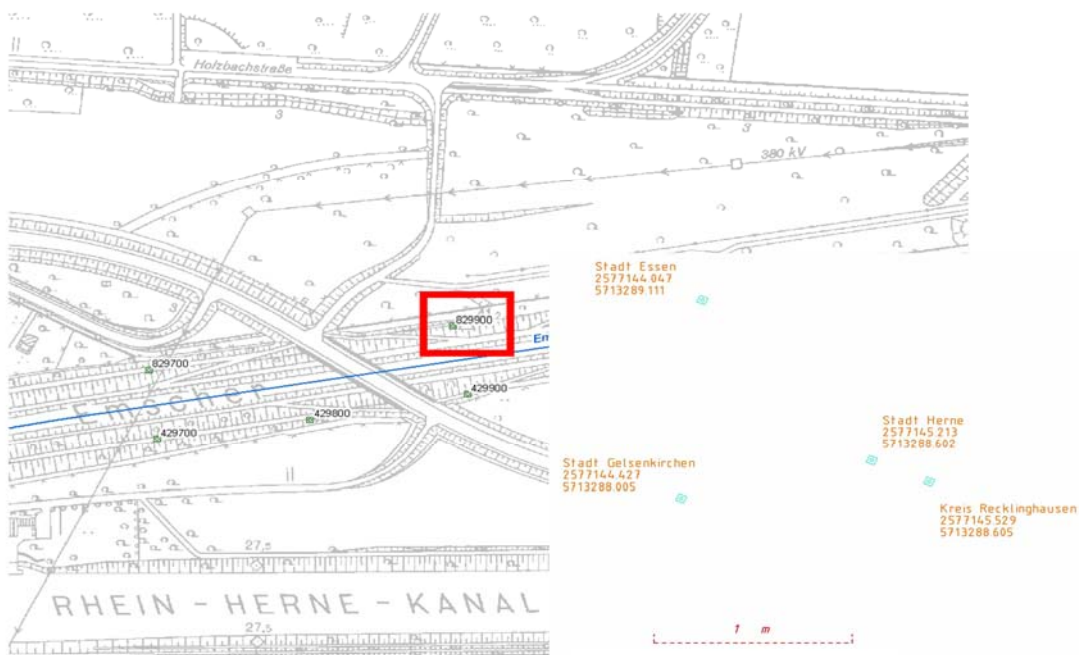


Abb. 3.14: Koordinatendifferenzen des Festpunktes 829900, Emscher in Gelsenkirchen



#### 3.3.4 Lage- und Höhenbezugssystemwechsel im Emscherprojekt

Am 9. August 2004 hat das nordrheinwestfälische Innenministerium den „Einführungserlass ETRS89/-UTM“ veröffentlicht. Die Grundsatzentscheidung zur Einführung eines zeitgemäßen Bezugssystems aus den Jahren 1991 und 1995 konnte damit umgesetzt werden. Eine Umstellung in diesen Ausmaßen benötigt eine konsequente Projektplanung und bedarf einer ausreichenden Zeit und ist mit allen Fachabteilungen abzustimmen, die sich mit Geodaten befassen (KRÜGER ET AL. 2008).

Bei der Umstellung der Koordinaten des Netzes 158 der Stadt Gelsenkirchen in das System ETRS89/UTM wurden Lagerestklaffen in Größenordnungen festgestellt, die den im vorherigen Kapitel genannten entsprechen. Eine Übersicht (Abbildung 3.15) zeigt die verschiedenen Restklaffen innerhalb des Stadtgebietes.

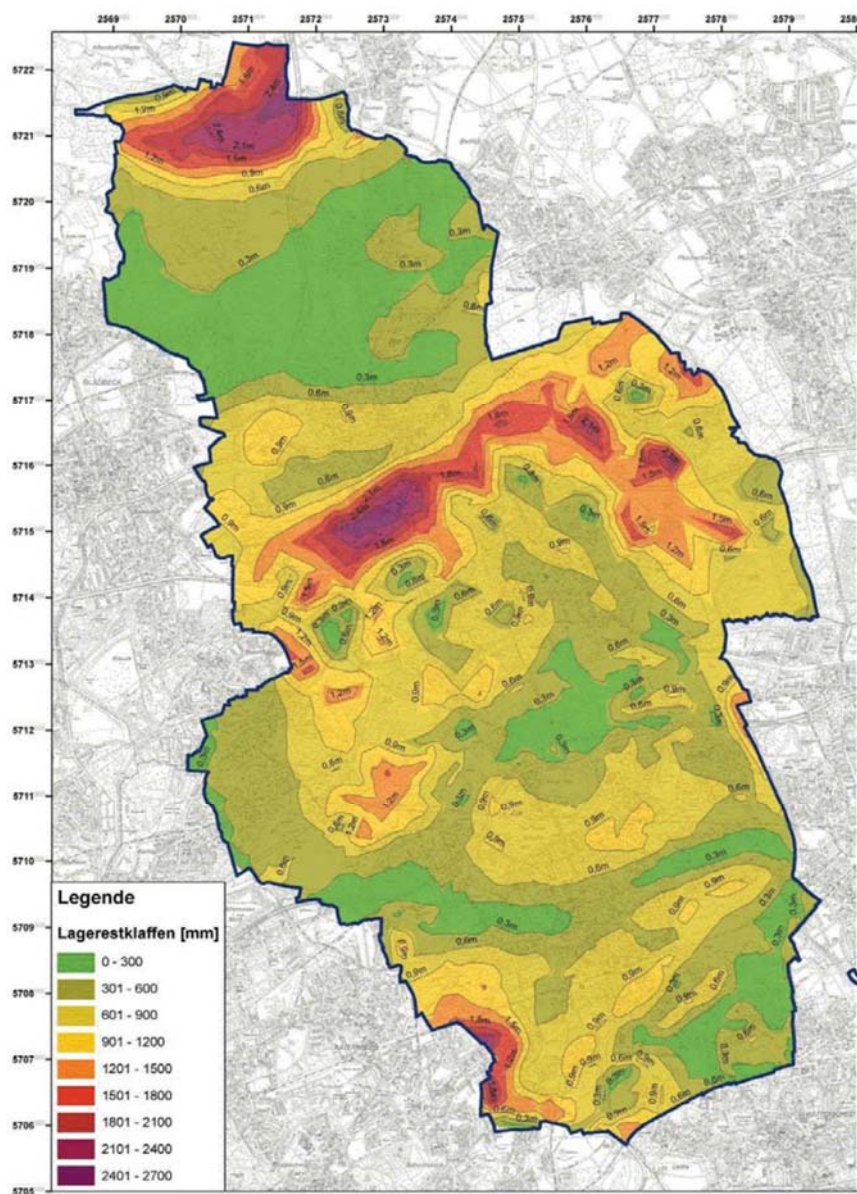


Abb. 3.15: Stadt Gelsenkirchen, Darstellung der Restklaffen (FRIEDL und LACH 2008)

Im Jahr 1991 hat sich die Emschergenossenschaft Essen entschieden, das bisherige offen geführte Abwasserbachsystem in den Untergrund zu verlegen. Für entsprechende Planungs-

arbeiten mussten entlang der Emscher und ihrer Nebenläufe vielfältige Grundlagenvermessungen, besonders die Geländeaufnahmen durchgeführt werden, wie sie im Kapitel „Erstellung der Planungsgrundlagen für Tunnelbaumaßnahmen“ aufgeführt wurden.

Sämtliche Vermessungen bezogen sich auf das zu diesem Zeitpunkt gültige bzw. althergebrachte Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Eine Umstellung auf das neue Bezugssystem ETRS89 konnte nicht Berücksichtigung finden, da erst 1991 die Einführung beschlossen wurde und somit verständlicherweise noch kein Fahrplan über die Art und Weise der Einführung existierte. Eine Umstellung der Koordinatensysteme nach dem Einführungserlass im Jahr 2004 ist auch nicht erfolgt, da bis dahin schon eine Vielzahl von Teilabschnitten im Emscherprojekt auf Basis der GK-Koordinaten ausgeplant oder sich im Bau befanden. Diese Projekte mit all ihren Planungs- und Bestandsunterlagen „umzuschreiben“ wurde vermieden. Fertiggestellte Anlagen, Bauwerke, Kanäle usw. werden zuerst im bestehenden Lagesystem der Emschergenossenschaft bestandsvermessen, um einen Vergleich zwischen der Planung und der tatsächlichen Bauausführung durchführen zu können, dem Soll-Ist-Vergleich. Anschließend werden alle Geodaten in das ETRS89/UTM-System transformiert.

In Bauprojekten anderer Auftraggeber oder auch z. B. städtischer Bauverwaltungen kann die Entscheidung zum Bezugswechsel anders ausfallen. Es bleibt immer eine Einzelfallentscheidung, die auf das jeweilige Projekt angepasst sein muss.

(KRÜGER ET AL. 2008) führen zum gleichen Thema an, dass bei der Stadt Dortmund mit allen Fachabteilungen eine Vereinbarung getroffen werden konnte, dass begonnene Bau- und Planungsprojekte ausnahmslos in GK abzuschließen sind und UTM erst für alle ab 2008 beginnenden Projekte einzusetzen ist.

Die Umstellung von NN- auf NHN-Höhen wird wie bei der Koordinatenumstellung nach Abschluss der Bauarbeiten durchgeführt. Alle Bauwerkshöhen, hier besonders die abwassertechnisch relevanten Höhen der an- und abgehenden Haltungen in den Schachtbauwerken sowie die Einleithöhen der seitlich ankommenden Abwasserkanäle aus den Nebeneinzugsgebieten stehen in direktem Zusammenhang mit dem Gesamtsystem Abwasserkanal Emscher. Alle bis dahin erstellten Pläne mit Höheneintragungen hätten ausgetauscht werden müssen, was zeitaufwendig und unter Umständen zu Übertragungsfehlern geführt hätte.

Die Differenzen zwischen den NN- und NHN-Höhen haben im Emschergebiet unterschiedliche Größen (Abbildung 3.7) und hätten für die verschiedenen Plan- und Bauabschnitte des Abwasserkanals angepasst werden müssen. Eine Umstellung mit einem Durchschnittswert von 17mm hätte nicht erfolgen können, da die geplanten Gefälleverhältnisse, wie in der Projektvorstellung erwähnt, nur 1,5 Promille betragen. Den Höhen in Abwasserprojekten ist generell besondere Beachtung wegen der Abflusssicherheit zu schenken. Vor diesem Hintergrund und in Zeiten des Nachbergbaus sind nach wie vor fortlaufende Beobachtungen von definierten Höhenfestpunkten notwendig.

### 3.4 Berücksichtigung der Höhen- und Lageproblematik

#### 3.4.1 Höhen

Für Planungs- und Bauprojekte sind während des aktiven Bergbaus wie zuvor erwähnt die Kenntnisse der aktuellen Senkungsverläufe von Bedeutung. Die Vermessungen wie Geländeaufnahmen, Quer- und Längsprofile usw. sind mit den zum Aufnahmezeitpunkt gültigen NN-Höhen durchgeführt worden. Mit diesen Höhen sind die Bauprojekte geplant worden. Da bis zur Bauausführung, i. d. Regel nach mehreren Jahren, die obertägigen Geländeänderungen durch den Steinkohlenabbau weiter fortgeschritten sind, mussten für die Planungsarbeiten die zukünftigen erwarteten Bergsenkungen mit berücksichtigt werden. Mit den NN-Höhen zum Zeitpunkt der Vermessung und den prognostizierten Senkungsbeträgen wurden die Planungshöhen ermittelt. Die Planungshöhen wurden demzufolge um den erwarteten Senkungsbetrag „höher“ angesetzt bzw. das Bauwerk wurde „höher“ geplant und gebaut. Die ursprünglichen Planungshöhen und damit die Bauwerkssollhöhen wurden nach Abklingen der erwarteten Bergsenkungen erreicht, so, als wenn es gar keine Bergsenkungen gegeben

hätte. Für alle am Bau und Planung Beteiligten ist von daher die Kenntnis des Höhenbezugs bzw. die Angabe des Höhenhorizontes von ganz entscheidender Bedeutung. In den Bauausführungsplänen sind stets die Höhenhorizontangaben aufgeführt.

In der Vorstellung des Emscherumbauprojektes wurde erklärt, warum erst zu Beginn der 1990er Jahre an einem Umbau des alten Emschersystems gedacht werden konnte. Der Grund lag darin, dass die Nordwanderung des Bergbaus ein Abklingen der Bergsenkungen herbeigeführt hat. In den Folgejahren wurden nur noch Setzungen in einer Größenordnung von wenigen Zentimetern festgestellt. Damit wird die Höhenproblematik zwar entschärft, darf aber auf keinen Fall unbeachtet bleiben. Auch die geringen Setzungsbeträge werden den Planern mitgeteilt. Sie überprüfen daraufhin ihre Planung und entscheiden die weitere Vorgehensweise besonders vor dem Hintergrund der geringen Gefälleverhältnisse in den zu bauenden Abwasserkanälen.

#### 3.4.2 Lage

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Problematik der spannungsbehafteten Koordinaten auf Grund des kommunalisierten Katasters und der Bergbauaktivitäten näher beleuchtet. Das Katasterzahlenwerk wurde seit Beginn des Bergbaus von horizontalen und vertikalen Bewegungen beeinflusst (Abbildung 3.13). Die Beträge der Katasterspannungen sind durch die verschiedenen Abbaupochen gleich- und gegenläufig gerichtet. In kleinräumigen Projekten innerhalb eines Katasteramtsbezirks und in direkter Nachbarschaft bleiben die Beziehungen in den meisten Fällen erhalten und brauchen nicht weiter berücksichtigt werden (FRIEDL und LACH 2008).

Für das Projekt „Bau des Abwasserkanals Emscher“ und für die Bäche aus den Nebeneinzugsgebieten liegen 3D-Geländemodelle für die Planungsarbeiten vor. Während in den Nebeneinzugsgebieten die Bachläufe häufig nur in einem Katasterbezirk liegen, besteht das Geländemodell für den Abwasserkanal Emscher aus vielen Einzelmodellen, die zudem wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, mit verschiedenen Zeitstempeln versehen sind. Bei einer räumlichen Ausdehnung von ca. 50 Kilometern kreuzt der zu bauende Abwasserkanal (Abbildung 3.16) 7 Katasteramtsbezirke mit 7 unterschiedlichen Koordinatenstatus (Dortmund, Recklinghausen, Gelsenkirchen, Essen, Bottrop, Oberhausen und Dinslaken).



Abb. 3.16: Der Abwasserkanal Emscher und die Katasteramtsbezirke

Die Planungsarbeiten für den Abwasserkanal wurden auf der Basis der spannungsbehafteten Geländeaufnahmen durchgeführt. Die Größe der Netzspannungen, die erst bei konkreten Absteckungen vor Ort vermessungstechnisch ermittelt werden können, war den planenden Bauingenieuren im Detail nicht bekannt.

Für die Trassenfindung und die Festlegung der Schachtstandorte bzw. der Press- und Zielgruben mussten vielfältige Sondierarbeiten durchgeführt werden. Neben den schon genannten Erkundungsbohrungen zur Baugrunderkundung wurden auf Grund der sehr dichten Infrastruktur in der Emscherregion mit ihren vielen unterirdischen Leitungen wie Ölleitungen, Kabelsträngen für die Anbindungen von Industrieanlagen zwecks Feststellung der genauen Lage und Höhe Schürfungen durchgeführt und in das vorhandene Geländeaufnahmemodell übernommen. Mit den Ergebnissen der Recherchen wurden die Schachtstandorte und die Kanaltrasse so festgelegt, dass möglichst keine Verlegungsarbeiten durchzuführen waren.

### 3.5 Aufbau von Vermessungsnetzen

Nach Beendigung der Planungsphase und vor Beginn der Bauausführungen beginnt die Absteckung bzw. Übertragung der Tunneltrasse und der Portalbereiche in die Örtlichkeit. Im Projekt Abwasserkanal Emscher besteht die ingenieurgeodätische Aufgabe gemäß Abbildung 3.1 in der Absteckung der Kanalachsen sowie der Mittelpunkte der Press- und Zielgruben. Realisiert wird diese Aufgabe durch die Anlage von Vermessungsnetzen.

Die Vermessungsnetze für den Tunnelbau werden in der Literatur verschiedentlich bezeichnet. RINNER und SCHELLING (1980) sprechen von Tunnelnetzen, die sie in ober- und unterirdischen Netzen teilen, ausgehend davon, dass unterirdische Bauwerke wie Tunnel, Stollen, Schächte und Kavernen immer mit oberirdischen Bauwerken im Zusammenhang stehen. Das oberirdische Netz verbindet Portal- und Schachtpunkte und erstreckt sich über den Gesamtbereich der ober- und unterirdischen Bauwerke, während das unterirdische Netz im Zuge des Vortriebes von den Portal- und Schachtpunkten aus entsteht.

KRÜGER (1985) spricht von drei Teilbereichen, die bei einer Absteckung für Tunnelnetze vorliegen, das Hauptnetz, die Portalnetze mit Vermessungspunkten in den Portalbereichen sowie dem unterirdischen Netz für Vortriebskontrollen (Abbildungen 3.17 – 3.19).

In heutigen Darstellungen von schon durchgeführten bzw. in Bau befindlichen Tunnelprojekten wird das oberirdische Netz oftmals als Grundlagnetz bzw. als Sondernetz bezeichnet, welches die Portalnetze mit ihren Portalpunkten beinhaltet. Das unterirdische Netz ist das Vortriebsnetz und dient der Vortriebssteuerung und den Kontrollvermessungen während der Auffahrung.

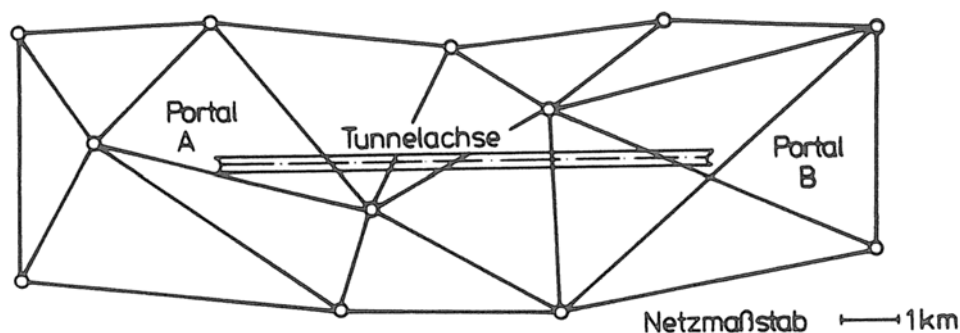


Abb. 3.17: Prinzipskizze oberirdisches Tunnelabsteckungsnetz / Hauptnetz / Grundlagnetz (KRÜGER 1985)

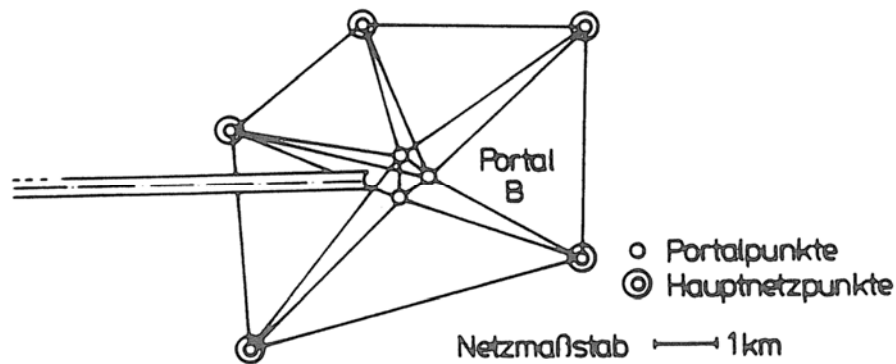


Abb. 3.18: Prinzipskizze Portalnetz mit Anschluss an das Hauptnetz (KRÜGER 1985)

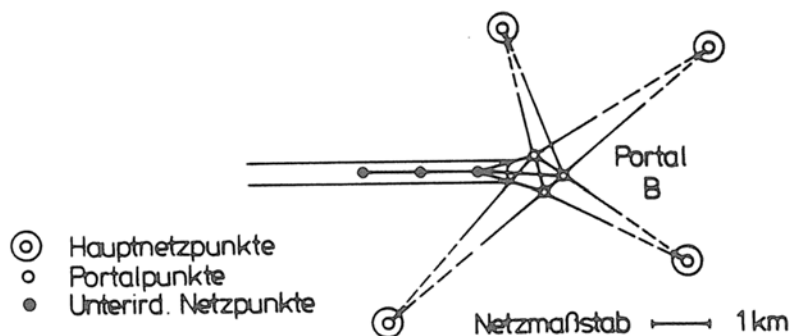


Abb. 3.19: Prinzipskizze Hauptvortriebskontrolle mit Anbindung an das Portalnetz (KRÜGER 1985)

Das Höhennetz spannt sich über alle drei zuvor genannten Netze auf Basis eines definierten Höhensystems (Kapitel 3.2.2). Von den Auswirkungen des Bergbaus wie im Projekt Abwasserkanal Emscher abgesehen, kann in Bauprojekten innerhalb eines Bundeslandes wegen der begrenzten Ausdehnung von Ingenieurprojekten mit amtlichen Höhenwerten gearbeitet werden. Für übergreifende Bauprojekte wie z. B. für den Bau einer Autobahn sind weitergehende Betrachtungen notwendig. Eine Trennung von Vermessungs- bzw. Ingenieurnetzen in zweidimensionale Lage- und eindimensionale Höhensysteme ist nach wie vor üblich.

## 3.6 Grundlagennetze

### 3.6.1 Allgemeines

An das Grundlagennetz als das über alle Einzelobjekte einer Baumaßnahme zu spannende Netz mit den insbesondere oben genannten Hauptpunkten, dem Press- und Zielschacht werden vom Bauherrn Anforderungen an die Genauigkeiten und Bautoleranzen vorgegeben bzw. mit dem späteren Nutzer abgestimmt. Das Ergebnis liefert Vorstellungen über den Netzaufbau.

Durch die örtliche Erkundung im Feld auf Basis der häuslichen Vorbereitungen anhand von Planungsunterlagen, digitalen Geländemodellen und Informationen aus Luftbildern wird ein erster Netzentwurf erarbeitet. Das führt zu einer Übersicht und Einschätzung über den zeitlichen Messaufwand. Entscheidend für die Erstellung eines Netzes sind Sichtverbindungen zwischen den Aufnahme- und Referenzpunkten. Vegetation, Infrastruktureinrichtungen wie Autobahnen, Bahnanlagen, Gebäude und Bauwerke können zu einer starken Beeinträchtigung der Sichtfreiheit führen. Bei der Erkundung und Festlegung von Mess- bzw. Instrumentenstandpunkten ist nach Möglichkeit trotz eventueller Sichtbehinderung darauf zu



achten, dass eine möglichst gute Netzkonfiguration (z. B. gleichschenklige Dreiecke, keine schleifenden Schnitte, gleichmäßige Punktverteilung) erreicht werden kann (SCHÄFER und WEITHE 2000). Netzknoten sollen über die gesamte Bauzeit nutzbar und vor Beschädigungen und Zerstörungen geschützt sein. Das Ergebnis des Netzentwurfs ist ein Netzplan mit der Lage der Netzknoten inklusiv eines Beobachtungsplans als plausibel erscheinende Startlösung.

Für die Startlösung ist eine simulierte Ausgleichung (Netzsimulation) durchzuführen. Eine Simulation wird stets mit fiktiven Beobachtungen durchgeführt. Um Fehlerellipsen der gesuchten Netzknoten berechnen zu können, werden hierfür die Näherungsknoten und die genannten fiktiven Beobachtungen mit ihren Genauigkeiten benötigt (CAROSIO 2008). Als Ergebnis erhält man numerische und graphische Werte für Genauigkeits- und Zuverlässigkeitskriterien, die geometrisch anschaulich sind und sich in der Praxis bewährt haben. Daraus leiten sich ggf. Modifikationen für den Beobachtungsplan ab. So können weitere Netzknoten eingeführt oder auch Sichten neu erkundet werden. Für den überarbeiteten Netzentwurf ist eine Folgesimulation für die Netzoptimierung durchzuführen und abermals zu beurteilen. Mit Hilfe von Fehlerellipsen kann auf die Genauigkeit geschlossen werden. Im weiteren Verlauf dieser Grundlagennetzbeschreibung werden beispielhaft die Auswirkungen verschiedener Datumsfestlegungen in Bezug auf die Konfidenzellipsen dargestellt (Abbildungen 3.25 – 3.28).

Die Überlegungen und Teilaufgaben mit den gegenseitigen Bezügen der Netzplanung sind in der nachfolgenden Abbildung 3.20 in einem Arbeitsablaufplan übersichtlich dargestellt (NIEMEIER 1985).

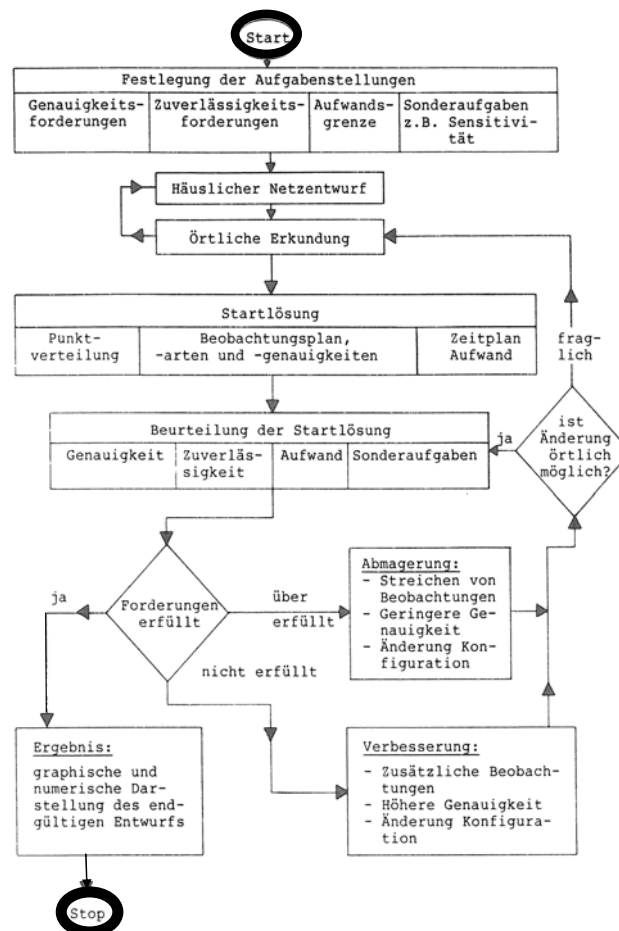


Abb. 3.20: Teilaufgaben und Arbeitsablauf bei der Netzoptimierung (NIEMEIER 1985)

Zu einer Netzoptimierung gehört die Minimierung des Arbeitsaufwandes (NIEMEIER 1985). Dem Wunsch nach hoher Netzqualität steht die Forderung nach minimalem Aufwand bzw. Wahrung der Wirtschaftlichkeit gegenüber (RINNER und SCHELLING 1980). Besonders in städtischen Bereichen mit starker Bebauung und Vegetation wie z. B. im Projekt „Umbau des Emschersystems“ diktieren die topographischen Verhältnisse maßgeblich den Netzaufbau, der trassennah erfolgen sollte. Mit den heutigen Tachymetern können die Netzpunkte durch die automatischen Satzmessungen und automatischen Zielverfolgungen wesentlich schneller und damit wirtschaftlicher bestimmt werden als in der Vergangenheit. Unter einer Messgenauigkeit ist laut DIN 18710-1 (2009) die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung eines Messergebnisses an den gesuchten Wert zu verstehen.

Der in der Abbildung 3.21 dargestellte Graph der Netzgüte als Funktion des Arbeitsaufwandes müsste dementsprechend aus heutiger Sicht steiler ausfallen. Die Güte eines Netzes definiert sich auf Grundlage von Genauigkeitsaussagen. Wesentlicher Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit bleibt die Geländetopographie und damit die Sichtverbindungen zwischen den Netzpunkten.

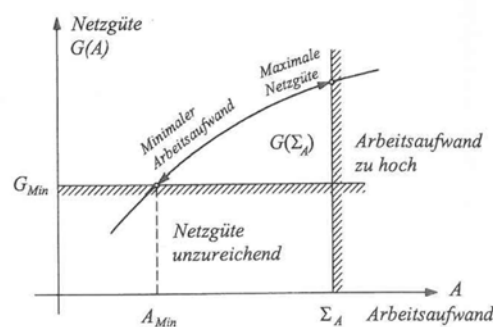


Abb. 3.21: Netzgüte  $G(A)$  als Funktion des Arbeitsaufwandes  $A$  (aus PELZER 1980)

Grundlagenternetze werden, wie zuvor erwähnt, als Sondernetze konzipiert, um unabhängig von eventuellen Netzspannungen bzw. Ungenauigkeiten in bestehenden amtlichen Bezugssystemen zu sein, welche gegebenenfalls für andere Anwendungszwecke aufgebaut wurden und meist nicht die ausreichend hohe Genauigkeit besitzen. Zudem sind die eingetretenen Bodenbewegungen aus den Bergbauaktivitäten als Spätfolgen zu berücksichtigen.

Bei der Grundlagenvermessung bzw. Anlage des Grundlagen/-Sondernetzes geht es neben der Absteckung bzw. Übertragung der Planungsachse in die Örtlichkeit auch um die während der Bauarbeiten durchzuführenden Kontrollvermessungen und geotechnischen Messungen z. B. für die Erstellung der Baugruben (SCHÄFER und WEITHE 2004). Diese nehmen wie in der Projektbeschreibung für das Umbauprojekt Emscher aufgeführt, beeindruckende Maße an. Tiefe und Durchmesser der Baugruben erfordern eine Baugrubenerstellung mittels Bohrpfehlwänden oder im Schlitzwandverfahren (Abbildung 3.40). Die zulässigen Abweichungen aus der Lotrechten dürfen im Projekt Abwasserkanal Emscher 1% der Baugrubentiefe nicht überschreiten.

Von der Güte des Grundlagenternetzes hängt die des Portal- und des Vortriebsnetzes ab. Ein homogenes, zwangs- bzw. spannungsfreies Netz ist somit eine Grundvoraussetzung für die geforderten Genauigkeiten im Tunnelbau (RINNER und SCHELLING 1980), (HUSER und STUDER 2010). Deswegen sind die geodätischen Punktbestimmungen für die Netzanlage von fundamentaler Bedeutung.

Für die Anlage von Netzen besteht die Aufgabe darin, die Koordinaten der Netzpunkte mittels Beobachtungen zu bestimmen. Diese existieren bei Tachymetermessungen als Horizontal- und Vertikalrichtungen bzw. Zenitdistanzen und Strecken. Die Beobachtungen liegen ohne Informationen über Koordinatenwerte vor, besitzen lediglich die gegenseitige relative Lage der Netzpunkte zueinander, was als innere Netzgeometrie bezeichnet wird. Die relativen Lageinformationen haben aber keinen Bezug zu einem Koordinatensystem. Dieser

Bezug erfolgt in unterschiedlicher Weise und wird als Datumsproblem in der Geodäsie behandelt (NIEMEIER 2008). Mit Datum eines Netzes werden die jeweiligen Parameter bzw. Einflussgrößen charakterisiert, die es erlauben, ein Netz eindeutig in dem Koordinatensystem, in dem es berechnet werden soll, zu lagern bzw. festzulegen (FRÖHLICH und KÖRNER 1998). Demzufolge ist bei jeder geodätischen Punktbestimmung das Datumsproblem zu lösen. Die Lagerung und Orientierung des Netzes in einem Koordinatensystem erfolgt durch die Datumsfestlegung. Hierbei wird ein eindeutiger Bezug zwischen dem inneren Netz, welches aus den Messungen der zuvor genannten Messelemente entstanden ist und dem Koordinatenrahmen hergestellt, ohne die innere Geometrie des Netzes zu verändern (NIEMEIER 2008).

Ein einfaches Beispiel hierzu ist ein Nivellementnetz mit drei Höhenpunkten (Abbildung 3.22). Gemessen wurden die Höhenunterschiede zu drei Punkten, wobei die gesuchten Höhen zuerst einmal unbekannt sind.

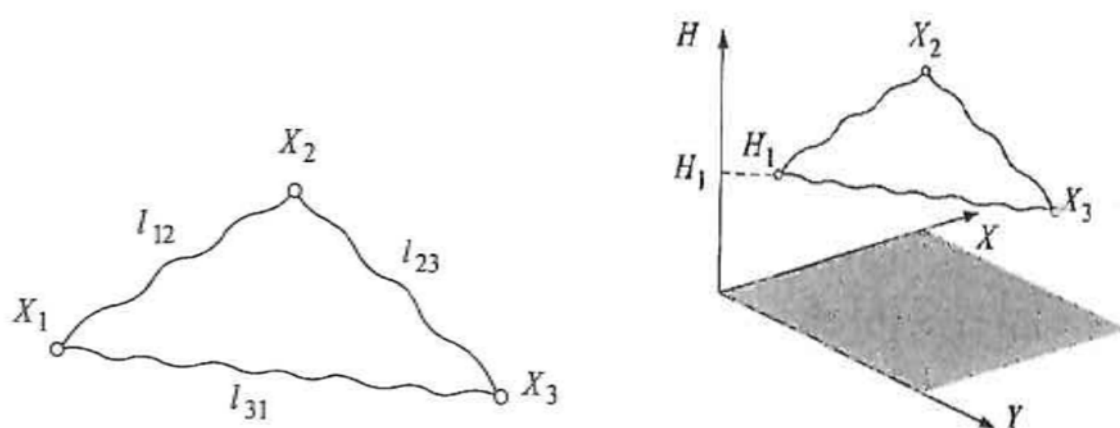


Abb. 3.22: Gemessene Höhenunterschiede zur Bestimmung von Höhen und Festhalten eines Punktes, hier Höhe  $H_1$  (NIEMEIER 2008)

Nach einer Ausgleichung liegen die Relationen untereinander fest. Damit ist aber nicht bekannt, in welcher absoluten Höhenlage sich das Netz befindet. Die Positionierung des Höhennetzes in einem Höhensystem erfolgt durch die Festlegung des Datums. Das wird dadurch erreicht, dass von mindestens einem Punkt die Höhe bekannt sein muss oder angenommen wird. Der Datumsdefekt  $d = 1$  ist damit behoben (Höhe  $H_1$  in der Abbildung 3.22). Die beiden anderen Punkthöhen ergeben sich dann aus der Höhe dieses Punktes (NIEMEIER 2008).

Um z. B. die Geometrie eines Dreiecks zu beschreiben, sind zwei Winkel und eine Seitenlänge nötig. Der dritte Winkel kann aus der Differenz der Dreieckswinkelsumme von 200gon errechnet werden. Um die Position des Dreiecks festzulegen, ist ein Punkt koordinatenmäßig vorzugeben. Um das Dreieck zu orientieren, wird eine Richtung einer Dreiecksseite notwendig ebenso wie ein Maßstab (Datumsdefekt  $d = 4$ ). Alternativ kann auch ein zweiter Punkt koordinativ vorgegeben werden. Das Dreieck ist eindeutig festgelegt, wenn vier Koordinaten angehalten werden (NAVRATIL und STAUDINGER 2006).

Ein 3D-Netz kann wie bei einem 2D-Netz um die  $X$ - und  $Y$ -Achse verschoben werden. Zusätzlich kommt eine Verschiebung entlang der  $Z$ -Achse hinzu. Das Netz kann darüber hinaus um alle drei Achsen gedreht werden. Ein Maßstab kann eingeführt werden, so dass ein 3D-Netz 7 Datumsdefekte enthalten kann.

Eine Übersicht über die möglichen Datumsdefekte und Datumparameter bei verschiedenen in der Praxis gebräuchlichen Netztypen zeigt nachfolgende Abbildung 3.23.

Dimen- sion	Netztyp	Art der Beobachtungen	Datums- defekt d	freie Datums- parameter
1	Höhennetz	Höhenunterschiede	1	1 Translation
2	Lagenetz	Strecken und Azimute	2	Translation in x - und y- Richtung
		Strecken oder Strecken- und Richtungen	3	2 Translatio- nen, Rotation um z-Achse
		Richtungen, Strecken- verhältnisse oder wie bei d=3 incl. Maß- stabsunbekannte	4	2 Translatio- nen, 1 Rotation 1 Skalierung
3	Raumnetz	Strecken und Zenit- distanzen oder Streck- en und Horizontal- richtungen oder Strecken und Horizontalricht. u. Zenitdistanzen	4	Translation in x-, y- und Richtung, Rotation um z-Achse
		Horizontalrichtungen und Zenitdistanzen oder wie bei d=4 (f=3) incl. Maßstabsunbe- kannte	5	3 Translatio- nen 1 Rotation 1 Skalierung
		Strecken	6	3 Translatio- nen Rotation um x-, y- und z- Achse
		wie bei d=6 incl. Maßstabsunbe- kannte	7	3 Translatio- nen 3 Rotationen 1 Skalierung

Abb. 3.23: Datumsdefekte und Datumparameter für charakteristische Netze (NIEMEIER 1985)

Für jede geodätische Punktbestimmung ist somit aus den angeführten Möglichkeiten stets eine Datumsfestlegung vorzunehmen bzw. das Datumsproblem zu lösen. Verschiedene Arten der Datumsfestlegungen stehen in der Methodenlehre der Netzkonzeption zur Verfügung.

Zu diesen Methoden gehören die

- zwangsfreie Ausgleichung,
- die freie Ausgleichung mit der Unterscheidung in der Gesamtspur- und Teilspurmini-  
mierung und
- Ausgleichung unter Zwang,

die beispielhaft erläutert werden

- a) an einem Grundlagentetz mit Strecken- und Richtungsmessungen (beginnend mit  
der Abbildung 3.24) und
- b) bei einem linienhaften Streckennetz (beginnend mit der Abbildung 3.29).

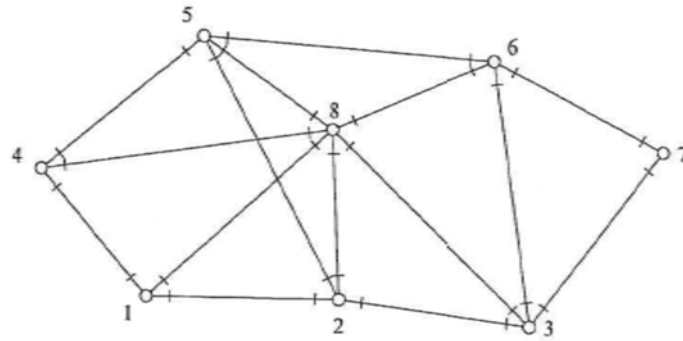


Abb. 3.24: Beispiel eines Richtungs- und Streckennetzes (NIEMEIER 2008)

Zu a) In der Praxis wird häufig die *zwangsfreie Lagerung* angewendet. Es können in dem Beispiel die Koordinaten des Punktes  $P_1$  mit  $X_1 = 1000,000\text{m}$  und  $Y_1 = 2000,000\text{m}$  eingeführt werden. Orientiert wird das Koordinatensystem über die Achse bzw. Messseite von  $P_1$  nach  $P_2$ , wobei  $X_2$  den gleichen Koordinatenwert wie  $X_1$  erhält, nämlich  $X_2 = 1000,000\text{m}$  und der  $Y_2$ -Wert von  $P_2$  aus dem  $Y_1$ -Wert von  $2000,000\text{m}$  zuzüglich der ausgeglichenen Strecke  $S_{1-2}$  gebildet wird (Abbildung 3.25). An der Ausgleichung nehmen diese Punkte nicht teil (NIEMEIER 1985). Durch die Elimination des Defektes bleibt die innere Geometrie erhalten.

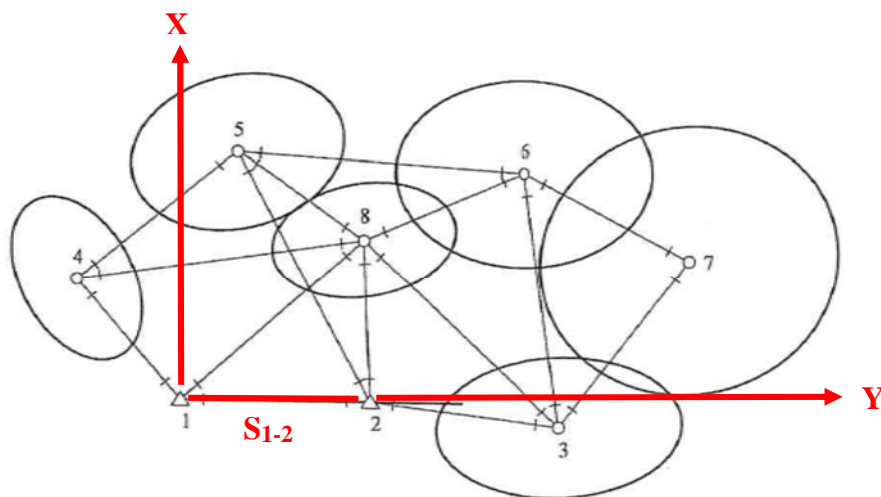


Abb. 3.25: Konfiguration des Lagenetzes mit Datumfestlegung der Punkte  $P_1$  und  $P_2$ , zwangsfreie Lagerung auf diese (NIEMEIER 2008)

Eine *freie Ausgleichung* bewirkt, dass die innere Geometrie durch eine Lagerung nicht beeinflusst wird, aber die Datumspunkte an der Ausgleichung teilnehmen (NAVRATIL und STAUDINGER 2006). Erfolgt eine Lagerung der inneren Netzgeometrie auf alle vorhandenen Netzpunkte, liegt eine Gesamtpurminimierung vor (Abbildung 3.26). Die Koordinaten der Netzpunkte werden dabei in Abhängigkeit von allen an der Ausgleichung teilnehmenden Punkten berechnet.

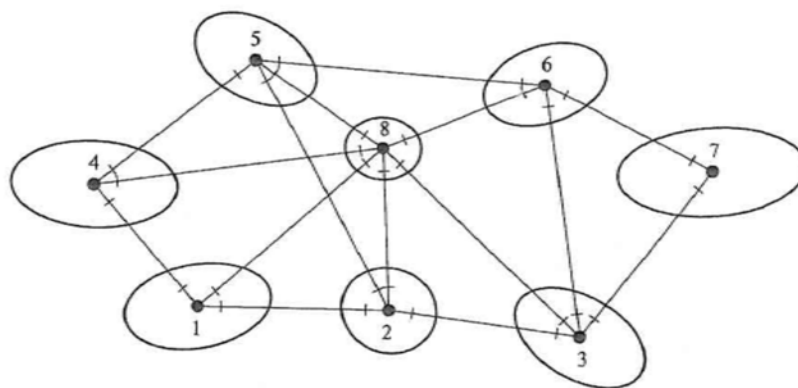


Abb. 3.26: Gesamtspurminimierung (NIEMEIER 2008)

Werden nur diverse Punkte für die Datumsfestlegung herangezogen (Abbildung 3.27), spricht man von einer Teilspurminimierung (NIEMEIER 1985). Das ist z. B. dann der Fall, wenn ein vorhandenes Netz verdichtet werden muss. Dann ist eine Verwendung aller Messpunkte nicht zwangsläufig notwendig.

Bei der Verdichtung des Grundlagennetzes liegen zwei Arten von Netzpunkten vor, nämlich die schon koordinativ bekannten Netzpunkte und die neuen, in diesem Fall die Portalpunkte. Die neuen Punkte sind dann auf die vorhandenen Punkte zu lagern.

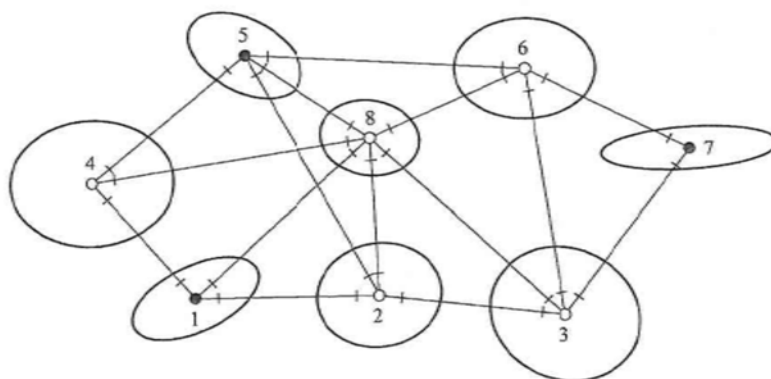


Abb. 3.27: Teilspurminimierung mit P1, P5 und P7 (NIEMEIER 2008)

Sind bei einem Ausgleichungsmodell mehr Koordinaten festzuhalten, als zur Lösung des Datumsdefektes nötig sind, liegt eine *Ausgleichung unter Zwang* vor (Abbildung 3.28). Die Koordinaten der festgehaltenen Netzpunkte bleiben dabei unverändert, was bewirkt, dass die innere Geometrie des Netzes unter Zwang eingepasst wird. Die Festpunktkoordinaten bleiben unverändert und nehmen an der Ausgleichung nicht teil. Das dabei zu Stande kommende Ergebnis ist eine verzerrte Netzgeometrie, die umso stärker unter Zwang gerät, je größer die Netzspannungen zwischen den Festpunkten sind. Man kann nicht mehr gut unterscheiden zwischen Koordinaten- und Messfehlern (CAROSIO 2008). Diese Ausgleichungsmethode findet überwiegend in der Landes- und Liegenschaftsvermessung statt und ist keine Alternative zu den oben angeführten Ausgleichungsverfahren, wenn es sich um Sondernetze wie oben beschrieben, handelt. Wird das Netz auf die gleichen Punkte gelagert und wird diesen eine Genauigkeit zugeteilt, handelt es sich um eine dynamische oder weiche Lagerung.

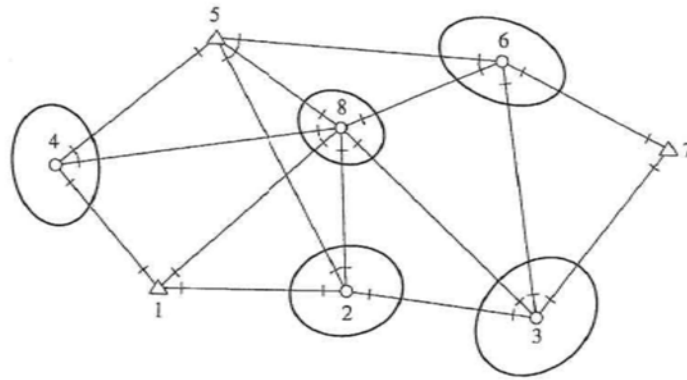


Abb. 3.28: Ausgleichung unter Zwang mit P1, P5 und P7 (NIEMEIER 2008)

In den Netzabbildungen 3.25–3.28 sind 95% Konfidenzellipsen ( $2\sigma$ ) graphisch dargestellt, die aus unterschiedlichen Berechnungsbasen entstanden sind. Die unmaßstäblichen graphischen Darstellungen zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Datumsfestlegung. Das zeigt sich sehr gut in der Abbildung 3.25, Datumsfestlegung mit den Punkten 1 und 2. Hierbei wird zudem erkennbar, dass es für die festgehaltenen Netzknoten keine Genauigkeitsangaben gibt. Das ist bei der Gesamtspurminimierung nicht der Fall, da hier für alle Netzknoten Genauigkeitsangaben erfolgen können. NIEMEIER (2008) zitiert MEISSEL (1969), der bei diesem Berechnungsansatz von „innerer Genauigkeit“ spricht, d. h. die Genauigkeit nur aus den Messgrößen hergeleitet werden kann.

Zu b) Zeigen die Abbildungen 3.24-3.28 oberirdische, d. h. auf das Grundlagenternetz bezogene Darstellungen der Auswirkungen des Bezuges zwischen geodätischem Datum und der Netzqualität, so führen NAVRATIL und STAUDINGER (2006) ein Beispiel eines Streckennetzes an, das als Vortriebs- und Tunnelnetz oder auch als überirdisches Netz z. B. für Verkehrsanlagen wie Bahn-, Straßen- oder Autobahntrassen (Abbildung 3.29) nachempfunden ist und auch hier die unterschiedlichen bzw. möglichen Lagerungen mit den resultierenden Fehlerellipsen aufzeigt. Von jedem Netzknoten aus wurden zu den jeweils benachbarten Punkten Strecken gemessen, was eine Anzahl von 102 Horizontalstrecken ergibt.

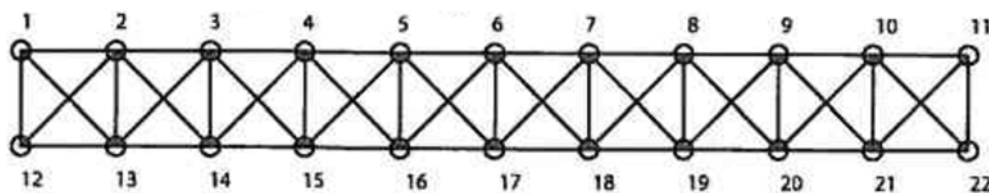


Abb. 3.29: Beispiel eines Streckennetzes (NAVRATIL und STAUDINGER 2006)

Wieder beginnend mit der *zwangsfreien Lagerung* müssen 2 Netzknoten festgehalten werden (Abbildung 3.30). Das Beispiel zeigt eine Simulationsberechnung mit den Punkten 1 und 12.

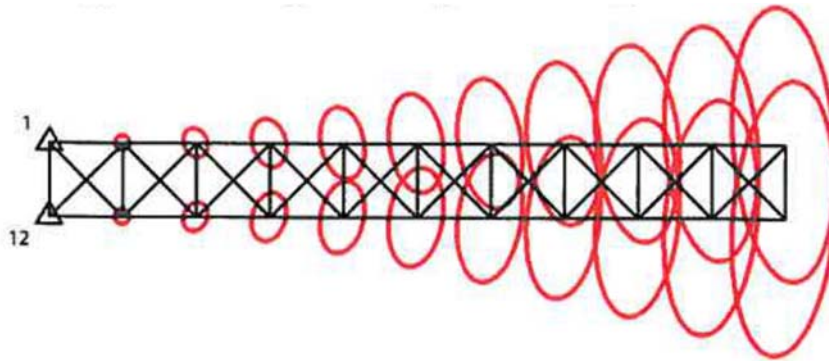


Abb. 3.30: Zwangsfreie Ausgleichung mit festgehaltenen Netzknoten 1 und 12 (NAVRATIL und STAUDINGER 2006)

Die Darstellung zeigt Fehlerellipsen, die, je größer der Abstand der Netzknoten von den Festpunkten wird, immer größer werden. Das ist nicht weiter verwunderlich, da kein Lageabschluss vorhanden ist. Wäre der Vortrieb beendet, d. h. der Durchstich im Zielschacht wäre erfolgt, würden sich die Fehlerellipsen bei einer Ausgleichung wie in der Abbildung 3.31 mit den Festpunkten 1 und 11 darstellen.

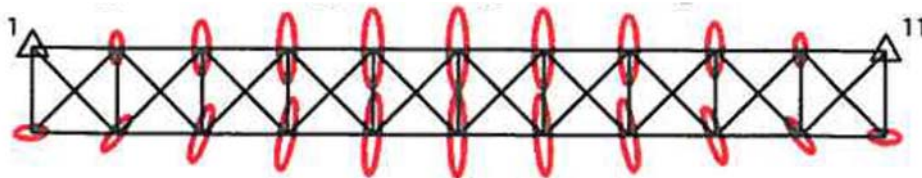


Abb. 3.31: Zwangsfreie Ausgleichung mit festgehaltenen Netzknoten 1 und 11 (NAVRATIL und STAUDINGER 2006)

Im Falle der *freien Ausgleichung* mit der Gesamtpurminimierung gibt es wie oben geschildert, keine Festpunkte. Es werden wieder alle Netzknoten für die Definition des Datums herangezogen (Abbildung 3.32). Bei den Fehlerellipsen der Netzeckpunkte 1, 11, 12 und 22 fällt auf, dass diese ungefähr doppelt so groß sind wie die anderen Netzknoten. Das erklärt sich dadurch, dass diese Punkte nicht durch so viele Messungen bestimmt worden sind wie die der anderen.

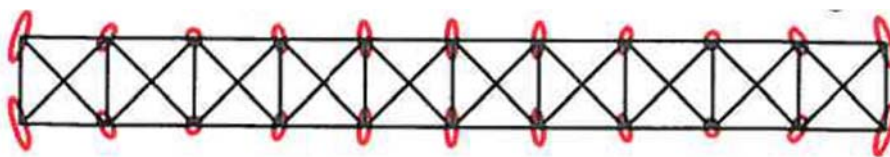


Abb. 3.32: Gesamtpurminimierung (NAVRATIL und STAUDINGER 2006)

Die Auswirkungen des Netzbeispiels im Falle der Teilspurminimierung zeigt die Abbildung 3.33 mit den Netzknoten 1, 11, 12 und 22. Die Größen der Ellipsen sind vergleichbar mit denen aus der zwangsfreien Ausgleichung mit den Netzknoten 1 und 11 (Abbildung 3.31).

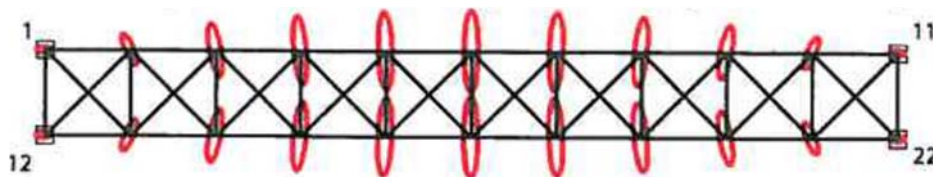


Abb. 3.33: Teilspurminimierung mit Datumspunkten 1, 11, 12 und 22 (NAVRATIL und STAUDINGER 2006)



Bei der Ausgleichung unter Zwang oder auch gezwängten Ausgleichung sind die Netzpunkte 1, 11, 12 und 22 als feste Netzpunkte eingeführt (Abbildung 3.34). Als Ergebnis erhält man Ellipsen, die deutlich kleiner sind als in den anderen Beispielen. Genauigkeiten können für die Ecknetzpunkte nicht angegeben werden. Auch hier, wie in dem Beispiel des gezwängten Grundlagentnetzes, führen eventuelle Netzspannungen zwischen den Festpunkten zu einer verzerrten Netzgeometrie, was zur Folge hat, dass die Ellipsen andere bzw. größere Dimensionen erlangen.

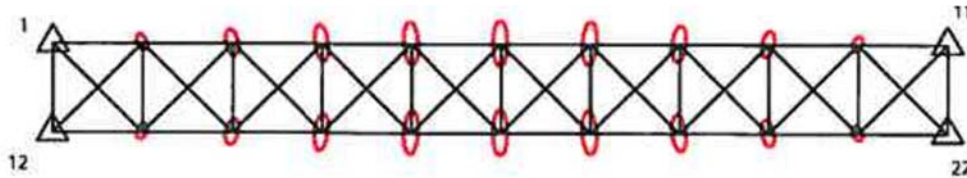


Abb. 3.34: Gezwängte Ausgleichung mit festgehaltenen Netzpunkten 1, 11, 12 und 22 (NAVRATIL und STAUDINGER 2006)

Die Qualität eines Netzes begründet sich zusammenfassend nach NAVRATIL und STAUDINGER (2006) in der richtigen Wahl des geodätischen Datums. Wie groß eine Fehlerellipse sein darf, entscheiden u. a. die Anforderungen an das Netz. Im Tunnelbau ist die Durchschlagsgenauigkeit von besonderer Bedeutung. Vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit ist auch die Anzahl der überschüssigen Beobachtungen zu berücksichtigen.

Auch die Richtung der vermuteten Bewegung ist nicht ohne Belang. Bei Hangrutschungsmessungen interessiert in erster Linie die Richtung der eventuell eintretenden Bewegung zum Hangfuß. Im Tunnelbau sind zuerst die orthogonalen Werte, d. h. die seitlichen Abweichungen (Querabweichungen) von der Solltrasse entscheidend. Durch die Angabe der Fehler- und Konfidenzellipsen können die gewünschten Genauigkeitsangaben erfolgen. In heutigen Programmen ist die Beurteilung der Netzqualitäten Standard z. B. mit Hilfe des Programms *PANDA* der Firma GEOTEC.

Die theoretischen Hintergründe, Ableitungen der Formeln und Rechenalgorithmen der Ausgleichungsrechnung werden hier nicht aufgeführt und sind der entsprechenden Fachliteratur zu entnehmen (NIEMEIER 1985, NIEMEIER 2008), (NAVRATIL und STAUDINGER 2006), (CAROSIO 2008).

#### 3.6.2 Grundlagentnetze im Projekt Abwasserkanal Emscher

Wie schon in der Projektbeschreibung zum Abwasserkanal Emscher (Kapitel 2) ausgeführt, liegt eine Vielzahl von Schachtbauwerken vor. Während der Bauzeit fungieren sie als Press- und Zielgruben, die für die Bauausführung messtechnisch verbunden werden müssen.

Begleitend zu den Planungsarbeiten für den Bau des Abwasserkanals Emscher wurde schon frühzeitig an einer ingenieurgeodätischen Lösung der Netzthematik gearbeitet. Für die vermessungstechnische Begleitung, d. h. für die Absteckungen der oberirdischen Bauwerke und für die späteren Vortriebskontrollvermessungen standen zwei Alternativen für die Anlage des Grundlagentnetzes zur Diskussion.

Wie bei den vorgenannten Tunnelprojekten ein über alle Portale aufgebautes Grundlagentnetz die Basis für die Vortriebsarbeiten war, so kann auch als erste Alternative im Emscherprojekt ein Netz über alle Press- und Zielgruben gespannt werden. Der Aufwand und die Pflege eines Gesamtnetzes in einer stark industriell geprägten Region sind zeitintensiv. Durch Wegfall oder Beschädigung der Netzpunkte erhöht sich der Vermessungsbedarf durch die Absteckung und Koordinatenbestimmung von Neupunkten mittels Tachymetermessungen. Eine zweite Alternative besteht in der Anlage einer Vielzahl von einzelnen Grundlagentnetzen, die sich jedes Mal nur auf einen Press- und Zielschacht und der dazugehörigen Vortriebsstrecke beziehen.

Die Emschergenossenschaft hat sich nach intensiven Beratungen entschieden, auf ein einzelnes Grundlagennetz von Dortmund nach Dinslaken zu verzichten. Dies aus den zuvor genannten Überlegungen sowie unter dem Aspekt, dass schon ein einheitliches Höhennetz existiert. Des Weiteren kann auf die Besonderheiten im Emschergebiet mit den Katasterspannungen, die auf der Gesamtstrecke des Emscherabwasserkanals unterschiedliche Größen aufweisen, reagiert werden. Es brauchen nur die Netzspannungen in dem jeweiligen Haltungsbereich berücksichtigt werden. Netzspannungen in den anderen Bereichen bzw. Haltungen üben keinen Einfluss auf dieses Grundlagennetz aus. Die Arbeitsweise des haltungsweisen Netzaufbaus hat sich zudem in den Nebeneinzugsgebieten, wo schon Vortriebsmaßnahmen durchgeführt wurden, bewährt.

Werden aus einem Pressschacht heraus weitere Zielschächte angefahren, so sind diese Haltungen in dieses lokale System einbezogen.

Die nachstehende Abbildung 3.35 zeigt einen Abschnitt im Abwasserkanalprojekt Emscher mit aneinander gereihten einzelnen Grundlagennetzen, die sich stets in einem Schacht, der entweder als Pressgrube oder als Zielschacht fungiert, überlappen. Die Orientierung und Größe eines jeden Grundlagennetzes richtet sich nach der Lage der Haltung. Darauf bezogen ist ein Koordinatensystem zu generieren.

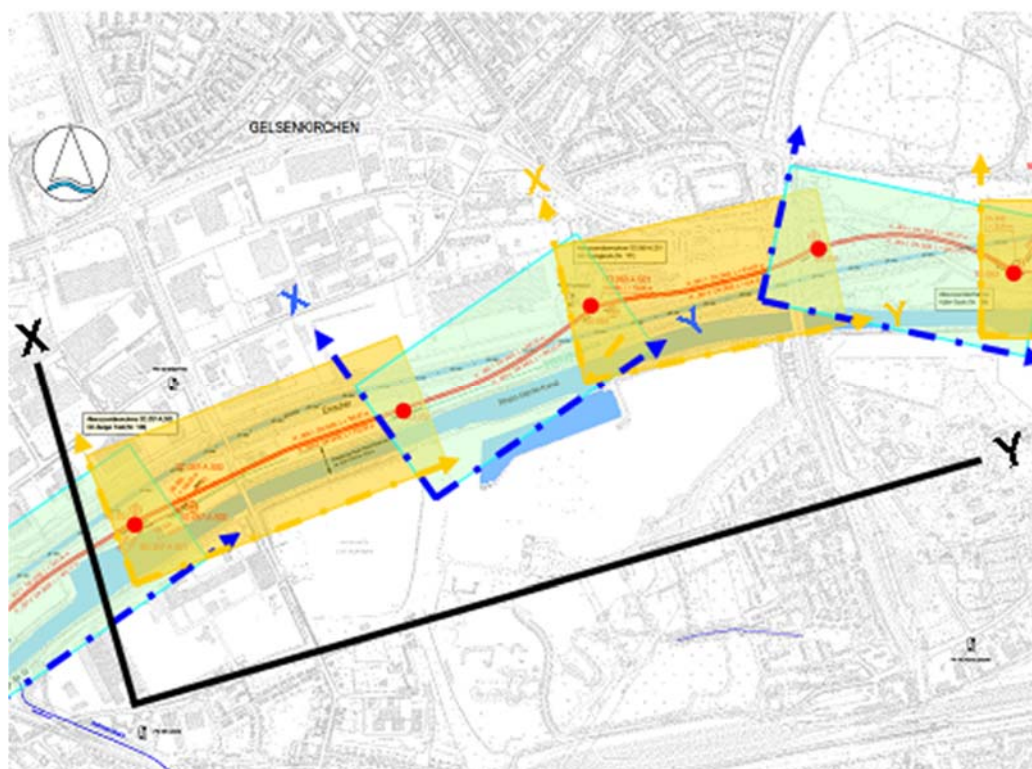


Abb. 3.35: Haltungsweiser Aufbau von Grundlagennetzen, Abwasserkanal Emscher

Die Übertragung der Kanaltrasse und der Mittelpunkte der Schächte im Projekt „Bau des Abwasserkanals Emscher“ bzw. der Press- und Zielgruben in die Örtlichkeit erfolgt mit Messpunkten aus den Geländeaufnahmen (Kapitel 3.1).

Jeder einzelne Schacht wird nur mit Hilfe der Anschlusspunkte abgesteckt, die sich im unmittelbaren Bereich dieses Schachtes befinden. Die Anschlusspunkte entstammen aus den Grundlagenvermessungen. Damit wird die Forderung einer Absteckung nach dem Prinzip der Nachbarschaft erfüllt. Mögliche Restklaffen der Anschlusspunkte werden durch tachymetrische Messungen bestimmt. Anschließend wird aus dem jeweiligen ausgeglichenen Netz die Planungskordinate abgesteckt.

GPS-Verfahren können zum Einsatz kommen, wenn eine ausreichende Sicht zu den Satelliten vorhanden ist. Eine direkte Sichtverbindung der Anschlusspunkte untereinander würde entfallen. Die gemessenen GPS-Koordinaten müssen in das gegebene GK-Koordina-

tensystem der Grundlagenvermessungen transformiert werden, um Kenntnis über die Restklaffen zu bekommen. Aus dem GPS-Netz kann der geplante Schachtmittelpunkt analog der tachymetrischen Variante abgesteckt werden.

Durch Triangulation werden die beiden Schachtmittelpunkte miteinander verbunden. Zusätzlich zu den Dreiecksseiten können darüber hinaus noch Diagonalen gemessen werden, um überschüssige Beobachtungen zu bekommen (KAHMEN 1993).

Das Triangulationsergebnis liefert nach der Berechnung von Näherungskordinaten durch eine freie Ausgleichung (Gesamtspurminimierung) den Lagebezug zwischen der Pressgrube und dem Zielschacht. Die Koordinaten haben für jede Haltung einen direkten Bezug zu der Emscherachse in diesem Vortriebsabschnitt, da die jeweiligen lokalen Koordinatensysteme auf Grund der Vielzahl der Grundlagentetze so unterschieden werden müssen, dass es an keiner Stelle im Bauprojekt zu einer Koordinaten- und Punktnummernverwechslung kommen kann. Hierfür wird ein rechtwinkliger Bezug des jeweiligen Pressschachtmittelpunktes zur bisherigen Emscherachse mit der Stationierung der Emscher hergestellt. Der Pressschachtmittelpunkt bezogen auf die Emscherstation z. B. von 24,9+15,57 ergibt einen Rechtswert von  $Y = 24915,570$ . Der Hochwert  $X$  beinhaltet die Schachtnummer, erweitert mit der Zahl 1000, um negative Koordinatenwerte zu vermeiden. Für den Schacht S\_033 ergäbe sich der Hochwert zu 331000,000.

Die geplante im GK-Koordinatensystem vorliegende Tunnelachse wird über identische Punkte in das ausgeglichene Dreiecksnetz transformiert. Die Tunnelachse liegt dadurch im gleichen Koordinatensystem vor. Daran schließt sich eine Überprüfung der Tunnelachsgeometrie an.

Durch die Transformation der geplanten Tunnelachse in das spannungsfreie Netz kann sich die Achsgeometrie verändern. Bei geradverlaufenden Trassen ändern sich gegebenenfalls die Achsrichtungen und die Haltungslängen. In Trassen mit Bögen verändern sich Tangentenrichtungen und die Stationen der Bogenhauptpunkte. Das findet Berücksichtigung, indem z. B. die Bogenhauptpunkte unter Beibehaltung der Kurvenradien in ihrer Station verschoben werden. Gleichzeitig sind mögliche Zwangsabstände zu Gebäuden, Bauwerken, Leitungen, Masten u. ä. zu überprüfen.

## 3.7 Portalnetz

### 3.7.1 Anlage der Portalnetze

Nach dem Grundlagentetzaufbau erfolgt die Einbindung des Portalnetzes. Das Portalnetz ist ein Teil des Grundlagentetzes und dient der Übertragung von Richtung, Lage und Höhe bzw. der dreidimensionalen Koordinatenübertragung in den Startschacht, aus dem der Vortrieb begonnen wird. Das Portalnetz wird entweder im Zuge der Erstellung und Bestimmung des Grundlagentetzes gleichzeitig eingemessen oder wenn die Festlegung erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt, in das vorhandene Grundlagentetz nachträglich eingebunden. Das richtet sich nach dem Bauablaufplan. Da die Baufirma in der Regel erst nach Übergabe des Grundlagentetzes ihre Baustelle mit Baucontainern, Lagerflächen und je nach Situation vor Ort z. B. Lärmschutzwände einrichtet, ist ein verfrühtes Festlegen der Portalpunkte unwirtschaftlich. Erst in Kenntnis der Baustelleneinrichtung kann zwischen den Bauherren- und Baufirmenvermessern und dem Baustellenverantwortlichen im Rahmen einer Erkundung eine Festlegung der Portalpunkte so erfolgen, dass sie zu jeder Zeit untereinander sicht- und damit auch anmessbar sind. Aus dem Festpunktfeld der Startbaugrube heraus werden die Vermessungspunkte im Rahmen einer weiteren Triangulation koordinatenmäßig bestimmt. Fernziele (z. B. Festpunkte des Grundlagentetzes) sind sinnvoll zur Stützung in das Messprogramm zu integrieren. Können aus örtlichen Begebenheiten keine Fernziele genutzt werden, ist die Portalnetzmessung mit der Grundlagenmessung erneut auszugleichen oder mittels Grundlagentetznunkten im Schachtgrubenbereich einer freien Ausgleichung (Teilsurminimierung) zu unterziehen.

In industriell geprägten Bereichen gestaltet sich die Wahl geeigneter Portalpunkte unter Umständen schwierig. Nachfolgendes Beispiel in der Abbildung 3.36 stellt die Situation dar, wie sich ein Portalnetz im Bauprojekt Emscher den örtlichen Begebenheiten anpassen muss. Im linken Teil befindet sich eine Umspannanlage, im rechten Bereich beginnt die Wohnbebauung und der südliche Bereich wird durch die an dieser Stelle hohen Emscherdeiche begrenzt. Die Messpfeiler und die Kopfbalkenprismen an der Startgrube sind an die auf dem Emscherdeich befindlichen Festpunkte angeschlossen. Richtungsmessungen zu Fernzielen (in diesem Fall möglich) stützen das Portalnetz.

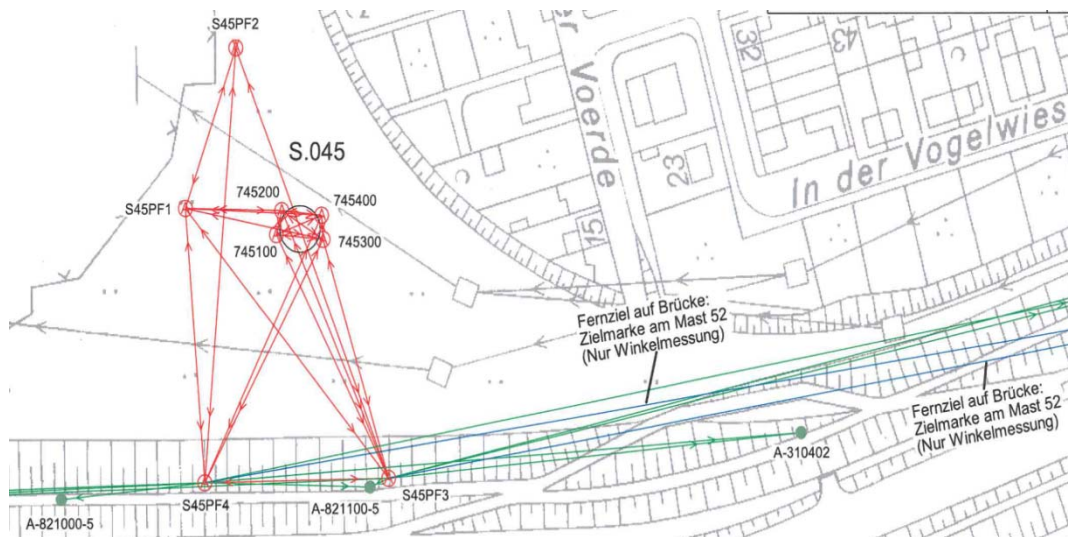


Abb. 3.36: Portalnetzaufbau unter schwierigen Bedingungen, Abwasserkanal Emscher

Die Portalpunkte müssen während der gesamten Bauzeit zur Verfügung stehen und dürfen nicht durch Bauaktivitäten zerstört werden. Um die Genauigkeit der Herablegung der Messpunkte und damit auch die Genauigkeit der Vortriebskontrollvermessungen zu erhöhen, sollten die Portalpunkte als Vermessungspfeiler ausgebildet werden, in der Regel bei längeren Haltungen. Im Projekt Abwasserkanal Emscher werden Vermessungspfeiler gesetzt, wenn die Haltung über eine Länge von 500m hinausgeht. Vermessungspfeiler sind für hochgenaue Netzmessungen als die stabilste Vermarkung anzusehen.

„Ein geeigneter Standpunkt für einen Vermessungspfeiler bedingt die Kenntnis der geologischen Verhältnisse vor Ort. Für viele Baumaßnahmen aus dem Tiefbaubereich finden bereits in der Planungsphase des Projekts Untersuchungen des Baugrunds statt, zum Beispiel mittels Rammkernsondierungen. Vermessungspfeiler sind stets außerhalb des Einflussbereiches der Baumaßnahme zu setzen. Der Abstand zwischen dem Vermessungspfeiler und des zu errichtenden Bauwerkes richtet sich nach dessen Tiefenlage und der jeweiligen Bodenart. Auf jeden Fall muss der Vermessungspfeiler außerhalb der Setzungsnulllinie platziert werden. Die Setzungsnulllinie ist die Höhenlinie, die rechnerisch keine Einwirkungen durch mögliche Einflüsse durch das Bauwerk erfährt. Der Bericht des Bodengutachters dient als Entscheidungsgrundlage für die Gründung und Standortwahl der Vermessungspfeiler.“ (ELING und KEMPER-BÖNINGHAUSEN 2014).

Die Abbildung 3.37 zeigt das Beispiel eines Portalnetzes, wo gute Voraussetzungen hinsichtlich der Sichtbarkeit und annähernd gleichmäßige Punktabstände vorliegen.



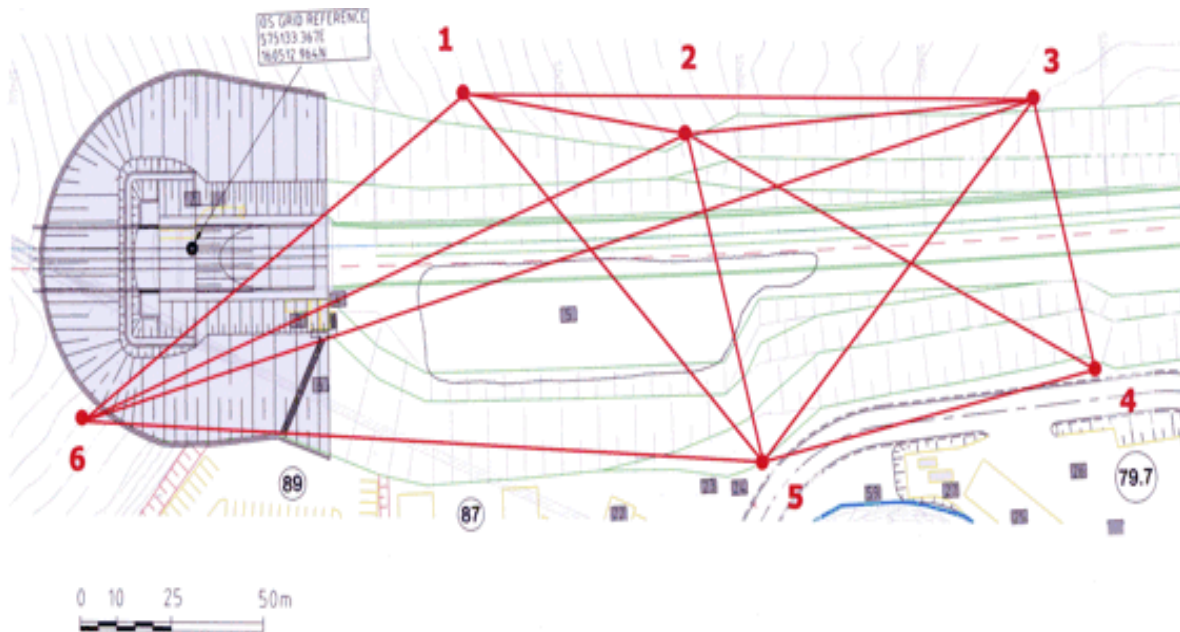


Abb. 3.37: Anordnung des Portalfeilernetzes am North Downs Tunnel (SCHÄFER und WEITHE 2000)

#### 3.7.2 Übertragung des Portalnetzes in den Startschacht

Die Übertragung des Portalnetzes für die Erstellung des Vortriebsnetzes erfolgt bautechnisch durch Pressgruben. Aus diesen heraus beginnt der Rohrvortrieb. Wie schon erwähnt, entsteht das unterirdische Netz im Zuge des Vortriebes.

Für die Übertragung des Portalnetzes in den Startschacht ist die Dimension des Schachtes ein entscheidender Parameter. Die Größe und Form der Startschächte, d. h. die Länge und Breite bzw. die Durchmesser und die Tiefen ergeben sich aus den Erfordernissen der Bauplanung. Es ist in der Regel nicht davon auszugehen, dass auf die schwierigen vermessungstechnischen Aufgaben für die Übertragung der Lage und Höhe auf die Schachtsohle Rücksicht genommen wird, schon aus Gründen der Kosten für die Erstellung von Startbaugruben. Ideale Annahmen, dass eine Startbaugrube so dimensioniert ist, dass Messpunkte auf der Schachtsohle ohne Ablesungen und Steilvisuren eingemessen werden können, sind, wie in der nachfolgenden Abbildung 3.38 zu sehen, nicht immer gegeben. Die Abbildung zeigt ein Beispiel einer Startbaugrube in Düsseldorf (Wehrhahnlinie). Je nach Projekt, Vortriebsverfahren, örtlichen Gegebenheiten und Kostengründen sind Startbaugruben so gering wie möglich zu dimensionieren.



Abb. 3.38: Beispiel einer Startbaugrube, Düsseldorf, Wehrhahnlinie (SCHMIDT 2010)

Im Projekt Emscherumbau kommen Start- und Zielbaugruben mit Durchmessern von teilweise nur 15m bei einer Tiefe von bis zu 40m zur Ausführung. Sie werden größtenteils im Schlitzwandverfahren und an einigen Stellen auch im Bohrpfahlwandverfahren erstellt (Abbildungen 3.39 und 3.40). Seitliche vorgeschaltete Einlaufbauwerke weisen an einigen Kanalabschnitten auch rechteckige Grundrisse auf.



Abb. 3.39: Rundschaft mit Blick von der Sohle und Rundschaft aus der Vogelperspektive, Emscher-genossenschaft



Abb. 3.40: Schachterstellung im Schlitzwand- und Bohrpfahlwandverfahren, Emscher-genossenschaft

Die hochgenaue Übertragung des Portalnetzes auf die Schachtebene als Ausgangspunkt des Vortriebsnetzes ist von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der gesamten Auffahrung.

Heutzutage erfolgt die Koordinierung der Anschlusspunkte für das Vortriebsnetz in der Regel mit Hilfe der ausgereiften Technik der Tachymeter mittels Steilvisuren. Bekannte und bewährte Verfahren sind daneben koordinative Bestimmungen der Messpunkte im Schachtsohlenbereich durch optische Präzisionslote und Lotungen mittels mechanischen Loteinrichtungen. Die Verfahren haben heute noch ihre Berechtigung bei der Bestimmung von Messpunkten im Schachtsohlenbereich und besonders im Bergbau.

### 3.7.3 Optische Lotung

Bei der optischen Lotung wird die Ziellinie aus dem vertikalgerichteten Messfernrohr gebildet. Alle zu diesem Zweck verwendeten Instrumente werden als optische Lote bezeichnet (KNOBLACH 2009). Das Verfahren der optischen Lotung benötigt mindestens 2 Konsolen zur Aufnahme von Nadir/Zenitloten. Die Koordinaten der Zentren der Konsolen, die sich am Schachtrand oder Kopfbalken befinden, werden aus dem Portalnetz heraus zuvor tachymetrisch bestimmt. Das Pendant zur Nadirkonsole ist eine Konsole im Schachtsohlenbereich, die mit einem Kreuzschlitten versehen ist (Abbildung 3.41). Die Koordinaten der Anschlusspunkte auf der Schachtsohle werden im Vorwärtseinschnittverfahren bestimmt, wenn der Abstand der Konsolen zur Schachtwand groß genug ist und die Konsolen direkt mit dem Tachymeter besetzt werden können, ansonsten wird die freie Stationierung gewählt (Abbildung 3.42), gegebenenfalls findet eine Kombination beider Verfahren statt. Das Freiburger Zenit- und Nadirlot FG-L30 erreicht nach Herstellerangaben (FREIBERGER PRÄZISIONSMECHANIK) eine Genauigkeit von  $\pm 1,0\text{mm}$  auf 30m. Mit einem FG- L100 kann eine Lotung mit einem Lotfehler von  $\pm 1,0\text{mm}$  auf 100m durchgeführt werden.

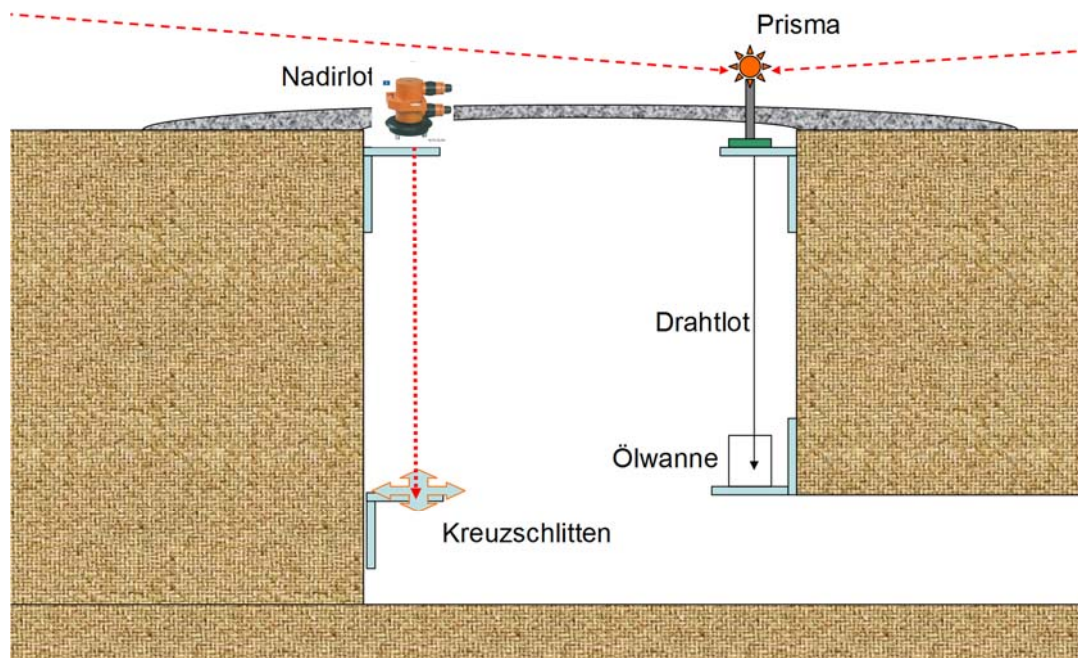


Abb. 3.41: Optische und mechanische Lotung zur Koordinatenübertragung

Die Genauigkeiten beim optischen Abloten werden wie bei allen optischen Messverfahren durch Refraktionen beeinflusst. Der Idealfall besteht darin, dass zum Zeitpunkt der Messung der Himmel bedeckt ist und die Temperaturunterschiede zwischen Schachtrand und Schachtsohlenbereich gering sind. Das lässt sich aber häufig nicht einplanen.

Die Höhenübertragung aus dem Portalnetz erfolgt durch ein geometrisches Nivellement sowohl für die Höhenbestimmung in der Baugrube wie auch bei Schachteufenmessungen im Bergbau. Dazu werden geeichte Messbänder am Schachtrand bzw. Kopfbalken abgehängt (entsprechend Abbildung 3.43). Mit den Korrekturparametern wie z. B. Zugspannung und Temperatur lassen sich die oberirdisch nivellierten Höhen auf die Schachtsohle bzw. auf die entsprechenden vermarkten Höhenbolzen/niete übertragen (SCHULTE ET AL. 1969).



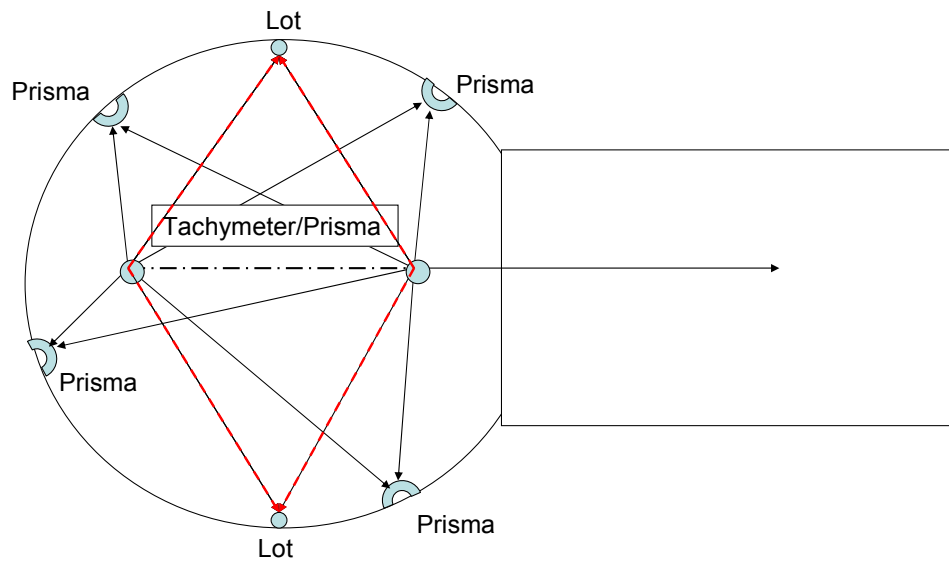


Abb. 3.42: Koordinatenübertragung durch Lotung und Bestimmung der Vortriebsrichtung

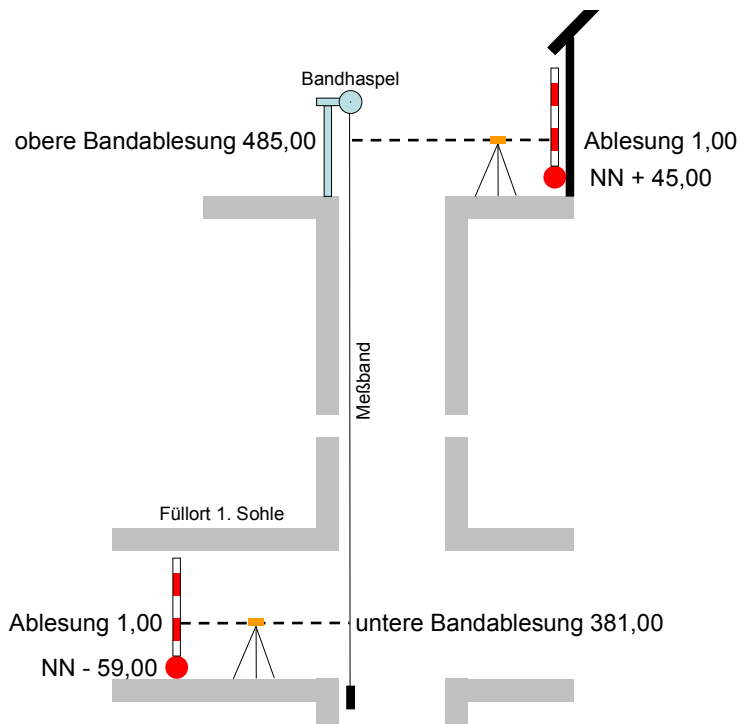


Abb. 3.43: Schachtmessband zur Schachtteufenmessung (nach SCHULTE ET AL. 1969)

Besondere Herausforderungen von Lotungen für die Übertragung der Koordinaten auf die Schachtsohle liegen beispielsweise im Projekt Absteckung des Gotthard-Basistunnels vor (Abbildung 3.44). Bei der kombinierten optischen und mechanischen Lotung im Vertikal-schacht Sedrun sind für die Koordinatenübertragung auf die 800m tiefe Sohle Gewichte von

bis zu 400kg eingesetzt worden. Die Schwingungsmittellage als Mittelpunkt einer Ellipsoide am Schachtfuß kann mit einer Präzision unter 10mm ermittelt werden (SCHÄTTI 2006). Mit bis zu 123m tiefen Schächten liegen im Projekt Trinkwasserstollen Uetliberg ebenfalls beeindruckende Tiefen vor. Die Lotungen (Abbildung 3.45) erfolgten optisch mit jeweils 3 Lotpunkten im Schachtsohlenbereich (HUSER und STUDER 2010).



Abb. 3.44: Optische Lotung, Schacht Sedrun (SCHÄTTI 2006)



Abb. 3.45: Nadirlotung Trinkwasserstollen Uetliberg (HUSER und STUDER 2010)

#### 3.7.4 Mechanische Lotung

Eine Übertragung der Koordinaten aus dem Portalnetz auf die Schachtsohle kann auch durch mechanische Lotung erfolgen.

Bei der mechanischen Lotung werden mindestens 2 Faden- oder Drahtlote an fixierten Punkten wie z. B. Konsolen oder Winkeleisen befestigt, die gegenüberliegend am Schacht- rand oder Kopfbalken montiert sind und deren Aufhängepunkte, ausgebildet mit Messprismen, vorab tachymetrisch aus dem Portalnetz heraus wie bei der optischen Lotung koordinatenmäßig bestimmt werden (Abbildung 3.41). Auch hier sind zwei Lotpunkte die Mindestzahl, um eine Richtungsmessung in den Tunnel zu ermöglichen (Abbildung 3.42). Zur Dämpfung der Lotschwingungen werden die Lotendpunkte in einem Dämpfungsbad, z. B. in einer im Schachtsohlenbereich befindlichen Ölwanne, beruhigt. Die Bestimmung der Anschluss- punkte im Schachtsohlenbereich erfolgt wie bei der optischen Lotung. Die mechanische Lotung ist frei von Refraktionseinflüssen. Die Höhenübertragung auf die Schachtsohle erfolgt wie bei der optischen Lotung.

Als Alternative zu den optischen und mechanischen Lotungsverfahren wurde durch JACOBS (1991a) ein Verfahren mittels Zenitdistanzmessungen vorgestellt. Dieses Verfahren, ursprünglich von MORLOT (1989) angewendet, welches zu seiner Ausführung nur einen mit Zenitokular ausgerüsteten Theodoliten benötigt, ist geeignet, eine Ablotung entlang einer beschränkt von der Lotlinie abweichende Visur vorzunehmen. Im Falle von schrägverlaufenden Schächten, bei denen keine senkrechte Sichtverbindung zwischen Ober- und Untertage gegeben ist, bedeutet das Verfahren eine Möglichkeit der Koordinatenübertragung, z. B. beim Abteufen von Schächten im Bergbau und auch bei Schachtbauwerken in größeren Tiefen von beispielsweise 55m (WUNDERLICH 1995). Das Verfahren der Schräglotung mit dem Theodolit führt zu 2D-Koordinaten. Sowohl für die Lotung eines zu koordinierenden Punktes auf der Schachtsohle als auch für eine übliche Richtungsübertragung in einen Tunnel ist das Verfahren geeignet. JACOBS (1991a) hat die Berechnungswege beschrieben, auf die nicht näher eingegangen wird.

Hier erwähnt und nicht weiter beschrieben ist das durch die Firma *Argus GeoTech GmbH* entwickelte Verfahren der polaren Punktbestimmung aus dem Portalnetz heraus mit gleichzeitiger Streckenmessung. Der horizontale Zielstrahl des Tachymeters wird über ein Spiegelsystem, bestehend aus drei Orthogonalspiegeln, in einen lotrechten Strahl coaxial zur Stehachse umgelenkt. KNOBLACH (2009) beschreibt das Verfahren ausführlich und bezieht sich dabei auf (FUHRLAND 2006).

### 3.7.5 Gegenseitige Visuren

Gegenseitige Visuren finden in Startbaugruben Anwendung, wenn die Länge bzw. der Durchmesser der Baugrube größer ist als die Tiefe. Die Koordinatenübertragung erfolgt aus dem Portalnetz. In der Regel sind die Portalpunkte, zumeist Vermessungspfeiler, nicht im direkten Umfeld des Startschachtes aufgebaut. Der Grund liegt neben der Baubehinderung besonders darin, dass eine Bewegung der Portalpunkte sonst nicht ausgeschlossen werden kann. Um eine direkte Sichtverbindung zu den auf der Baugrubensohle aufgebauten Vermessungspunkten zu bekommen, sind Zwischenstandpunkte direkt an der Baugrube vorzusehen und durch Triangulation zu bestimmen (Abbildung 3.46). Die Höhenübertragung in die Grube erfolgt tachymetrisch. Messprismen in der Baugrubenwand stabilisieren das Herablegen der Messpunkte. Mögliche Refraktionen können minimiert werden, wenn bei der Festlegung der Mess- und Standpunkte ein weitestgehend großer Abstand zu den Baugrubenwänden eingehalten wird.

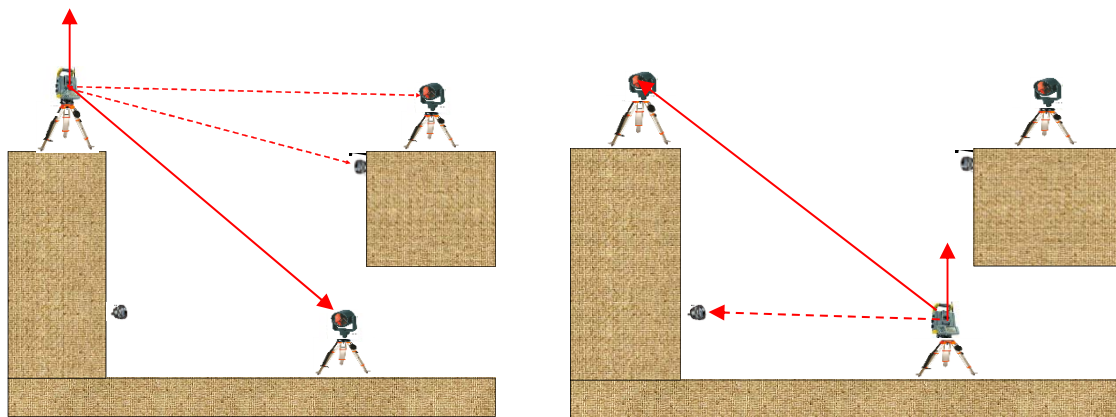


Abb. 3.46: Koordinatenbestimmung von Messpunkten in der Baugrube mittels gegenseitiger Visuren

### 3.7.6 Einseitige Steilvisuren

Liegt bei den Baugruben ein Verhältnis vor, bei dem die Tiefe größer ist als der Durchmesser, kann die Koordinatenübertragung durch das Messen von einseitigen Steilvisuren erfolgen (Abbildung 3.47). Hierbei ist das Tachymeter möglichst mittig auf der Schacht- oder Pressgrubensohle zu positionieren.

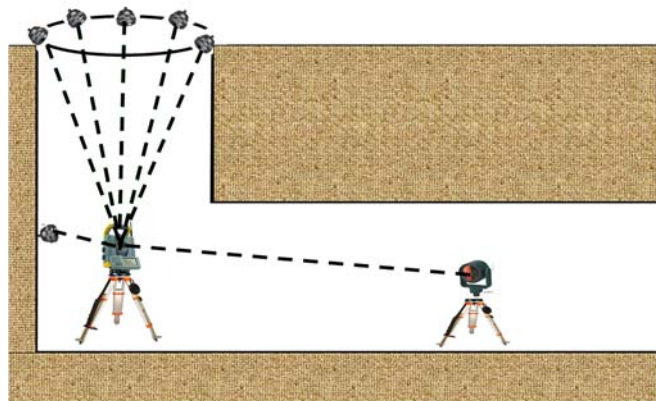


Abb. 3.47: Koordinatenbestimmung von Messpunkten in die Baugrube mittels einseitiger Steilvisuren

Dadurch wird erreicht, dass zur Schachtinnenwand überall der gleiche Abstand vorliegt und die Steilvisuren einen annähernd gleichen Neigungswinkel zu den Messpunkten am Kopfbalken bzw. Schachtrand haben. Die wünschenswerten Messbedingungen wie möglichst gleiche Temperaturverhältnisse am Schachtrand und im Schachtsohlenbereich sowie die Vermeidung von direkten Sonneneinstrahlungen sind, wie schon erwähnt, in der Praxis oft nicht gegeben. Der Zeitpunkt einer Koordinatenübertragung richtet sich gewöhnlich nach dem Baufortschritt. Die für die Koordinatenübertragung benötigten Messprismen werden auf dem Kopfbalken bzw. am Schachtrand möglichst gleichmäßig verteilt. Aus dem Portalnetz heraus erfolgt die Bestimmung der 3D-Koordinaten. Zusätzlich können auch hier zur Stützung der Herablegung Messprismen in mehreren Höhenebenen in der Baugrube an der Schachtinnenwand (Abbildung 3.48) montiert und eingemessen.



Abb. 3.48: Stützpunktprismen in der Schachtwand,  
Baustelle Emschergenossenschaft

#### 3.7.7 Messpunktübertragung in Projekten der Emschergenossenschaft

Die für die Loteinrichtungen notwendigen Konsolen können im Projekt Abwasserkanal nicht am Kopfbalken montiert werden. Absturzsicherungen in Form von geschlossenen Zaunanlagen verhindern die Zugänglichkeit zum innen liegenden Rand des mindestens 1m breiten Kopfbalkens.

Die Übertragung der Koordinaten auf den Schachtboden erfolgt deswegen durch Steilvisuren. Die hohen Tachymetergenauigkeiten (Kapitel 7 „Die Messverfahren im Vergleich mittels Simulationsberechnungen“) erlauben durchweg eine Herablegungsmessung mit Steilvisuren. Für die Montage und Bedienung der Kopfbalkenprismen ist eine Öffnung in der Zaunanlage vorhanden.

### 3.8 Vortriebsnetz

Das Vortriebsnetz dient der Vortriebssteuerung und den Kontrollvermessungen während der Auffahrung. Es ist immer an das Grundlagen- und Portalnetz gekoppelt. Während des Vortriebes wächst das Netz mit jedem weiter verlegten Rohr. Erst wenn der Durchschlag in den Zielschacht erfolgt ist oder wenn sich die Tunnelröhren, die aus entgegengesetzten Richtungen vorgetrieben wurden, getroffen haben, liegt das Vortriebsnetz in Gänze vor. Nachdem die Vortriebsmaschine aus dem Zielschacht geborgen worden ist, erfolgt eine Messung mit Hilfe eines beidseitig angeschlossenen Polygonzuges vom Pressschachtportal hinab durch den neuen Kanal und im Zielschacht hinauf zu den Zielschachtfestpunkten, um die wahre Lage und Höhe der Rohre ermitteln zu können.

KORITKE (1997) erwähnt in seiner Dissertation „Zur Anwendung hochpräziser Kreismessungen im Bergbau und Tunnelbau“, dass es in der geodätischen Fachliteratur viele Publikationen zum Thema Anlage von Vortriebsnetzen gibt und bezieht sich dabei z. B. auf die Arbeiten von ELMAGHRABY (1989), KRÜGER (1985), MATTHIAS (1984) und RINNER (1976). Die von ihm aufgeführten Beispiele für die Netzkonfigurationen im Tunnel entsprechen in etwa denen, die in den unten stehenden Abbildungen 3.49–3.52 dargestellt sind. Diese dokumentieren verschiedene Netzentwürfe vom einfachen Polygonzug bis zu versetzten Polygonmessnetzen. Die vielfältigen Vermessungskonzepte haben alle zum Ziel, die ungünstigen Fehlerfortpflanzungen auf Grund der Refraktionen zu minimieren. Eine optimale Lösung gibt es nicht, da sich jede Tunnelbaumaßnahme zu anderen durch ihre speziellen Anforderungen unterscheidet (STENGELE und SCHÄTTI-STÄHLIN 2010).

Angepasst an den jeweiligen Tunneldurchmesser stehen verschiedene Varianten für das Vortriebsnetz zur Verfügung. Jede Variante hat ihre Vor- und Nachteile in Bezug auf Genauigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Der einseitig angeschlossene einfache Polygonzug (Abbildung 3.49) hat einen richtungsmäßigen Anschluss, aber keinen bekannten Abschlusspunkt. Die Messung und Berechnung endet mit dem letzten Polygonpunkt vor der Vortriebsmaschine. Das Vortriebsnetz besteht infolgedessen aus schmalen Richtungs- und Streckenkette, welche von den Anschlusspunkten des oberirdischen Netzes (Grundlagen- und Portalnetz) entwickelt werden, deren geometrische Konfiguration während der Vortriebsarbeiten instabil ist (RINNER und SCHELLING 1980).

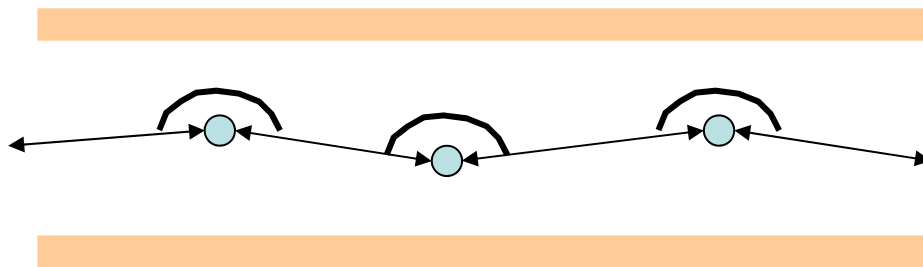


Abb. 3.49: Einfacher Polygonzug im Tunnel (nach KRÜGER 1985)

Die Bedingungen für die Anlage und Durchführung des Polygonzuges bei engen Verhältnissen sind wesentlich ungünstiger als Polygonzugmessungen im obertägigen Gelände. Je nach Trassierung der Tunnelachse kann eine Stützung des offenen Polygonzuges (Abbildung 3.50) dadurch erreicht werden, indem zusätzliche Messungen zu den jeweiligen benachbarten Standpunkten vorgenommen werden (MACHEINER und WINDISCHER 2013). Das kann aber nur bei Tunnelachsen durchgeführt werden, die möglichst gestreckt sind. Bei Achsen mit verschiedenen Trassierungselementen wie Kreisbögen und S-Kurven mit kleinen Radien ist oftmals eine Messvisur zu einem übernächsten Messpunkt nicht realisierbar.

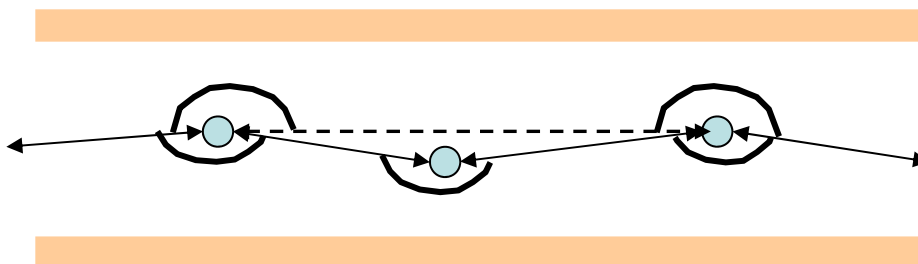


Abb. 3.50: Einfacher Polygonzug mit Stützpunkten (nach KRÜGER 1985)



Bei größeren Tunneldurchmessern kann ein Messnetz über Messpunkte angelegt werden, welche z. B. mit Hilfe von Konsolen gegenüberliegend an den Rohrwänden befestigt werden (Abbildung 3.51). Hierbei ist auf einen möglichst großen Abstand zur Rohrwand zu achten, um Refraktionseinflüsse zu minimieren, resultierend aus den Temperaturunterschieden zwischen dem Betonrohr und dem Rohrrinnen.

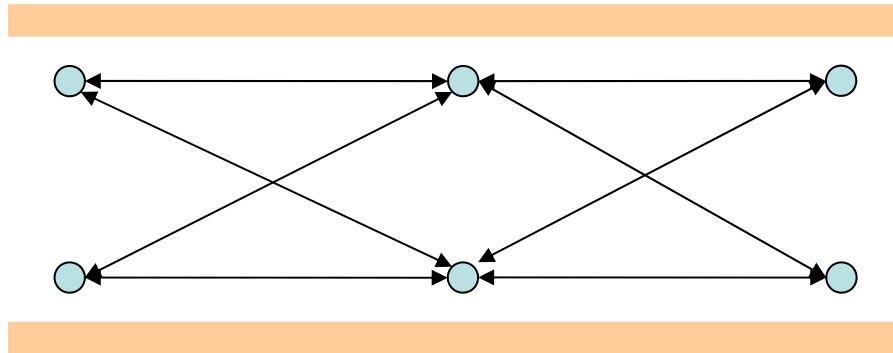


Abb. 3.51: Polygonmessnetz mit gegenüberliegenden Messpunkten (nach KRÜGER 1985)

Ein Messnetz kann auch mit versetzten Messpunkten ausgebildet werden (Abbildung 3.52). Auch hierbei werden Konsolen für die Besetzung mit Tachymeter und Messprismen in den Tunnel eingebaut.

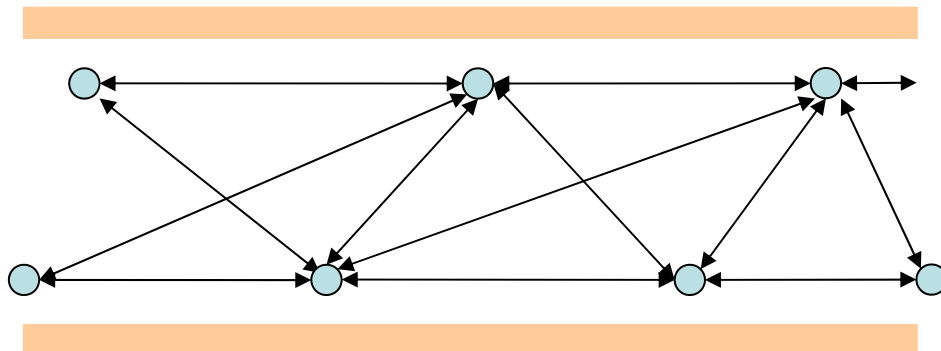


Abb. 3.52: Versetztes Polygonmessnetz (nach KRÜGER 1985)

Wie im Kapitel 2 „Umbau des Emschersystems“ beschrieben, ist der Abwasserkanal auf einer Länge von ca. 30 Kilometer mit einem Durchmesser DN1600 geplant. Die schon genannten beengten Verhältnisse lassen für die Anlage eines Vortriebsnetzes in der Regel nur einen einfachen Polygonzug zur Ausführung kommen.

Die Polygonzugstandpunkte und die Standpunkte der jeweiligen anderen Netzvarianten werden wechselseitig mit Tachymetern und Messprismen besetzt. Der Aufbau der Vermessungspunkte ist den jeweiligen Rohrsträngen anzupassen (Kapitel 3.10).

Die nachfolgende Netzvariante der Abbildung 3.53 unterscheidet sich zu den vorherigen Netzen dadurch, dass das Tachymeter hier nicht mehr auf dem Netzpunkt selber steht. Vom Tachymeterstandpunkt werden Messprismen angezielt. Eine direkte messtechnische Verbindung zum vorherigen und nachfolgenden Tachymeterstandpunkt erfolgt nicht. Diese Netzkonstellation kann in herkömmlicher Weise mit Messpersonal angewendet werden, ist aber für die autonome Kontrollvermessung (Kapitel 6) von großer Bedeutung.



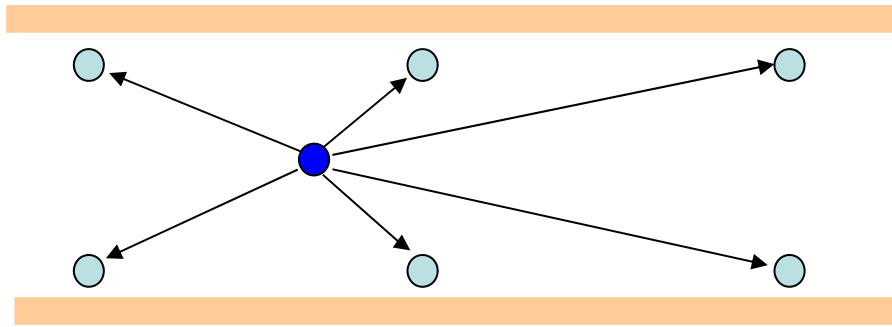


Abb. 3.53: Messnetz für die autonome Rohrvortriebsvermessung

Die Genauigkeitsanforderungen an die Grundlagen- und Portalnetze sowie des Vortriebsnetzes resultieren aus der Durchschlagsgenauigkeit, die bautechnisch erforderlich ist (KRÜGER 1985). Der Durchschlagsfehler ist ein Maß für den fehlertheoretisch möglichen Widerspruch für einen Punkt am Durchschlagsort. ELMAGHRABY (1989) definiert den zu erreichenden Durchschlagsfehler als eine prognostizierte, theoretische Standardabweichung des Durchschlagspunktes in Längs- und Querrichtung. Er bildet letztendlich die Grundlage für die weitere Vorgehensweise der Vermessung einschließlich des zu verwendenden Vermessungsinstrumentariums. Von der Güte des Grundlagnetzes hängt die Vortriebsgenauigkeit bzw. die Genauigkeit des Durchschlages in den Zielschacht ab. Der Durchschlagsfehler findet immer Anwendung am Durchschlagsort. Die Fehlerellipsen der letzten Polygonpunkte bzw. Messpunkte sind hierfür maßgebend (SCHÄFER und WEITHE 2000).

Die Standardabweichung des Durchschlagspunktes wird in Form einer Fehlerellipse mit den Halbachsen  $A$  und  $B$  dargestellt. Die Orientierung der Ellipse in einem Koordinatensystem erfolgt durch den Drehwinkel  $\theta$  (Abbildung 3.54).

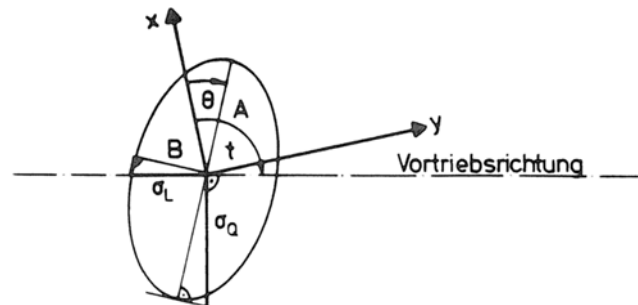


Abb. 3.54: Fehlerellipse (KRÜGER 1985)

Die Fehlerellipse wird beschrieben mit den Halbachsen  $A$  und  $B$  sowie mit dem Drehwinkel  $\theta$ . Dabei gilt nach NIEMEIER (2008):

$$\begin{aligned} A_F^2 &= \frac{1}{2} \sigma_0^2 (q_{xx} + q_{yy} + \omega) \\ B_F^2 &= \frac{1}{2} \sigma_0^2 (q_{xx} + q_{yy} - \omega) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\tan 2\theta_F = 2 \frac{q_{xy}}{q_{xx} - q_{yy}}$$

mit der Hilfsgröße

$$\omega^2 = (q_{xx} - q_{yy})^2 + 4q_{xy}^2.$$

Im Normalfall wird das Tunnelkoordinatensystem so festgelegt, dass die Koordinatenachse  $Y$  der Vortriebsachse entspricht. Dann stimmen die Halbachsen  $A$  und  $B$  mit den Querabweichungen  $\sigma_Q$  und Längsabweichungen  $\sigma_L$  überein. Der Drehwinkel  $\theta$  nimmt dann die Größe nahe 0gon auf Grund der Netzkonfiguration und die Richtung der Tunnelachse  $t$  mit 100gon an. Der Punktfehler bleibt bei einer Drehung des Koordinatensystems unverändert. Nach KRÜGER (1985) berechnen sich  $\sigma_Q$  und  $\sigma_L$  zu:

$$\begin{aligned}\sigma_Q^2 &= A^2 \sin^2(t - \theta) + B^2 \cos^2(t - \theta) \\ \sigma_L^2 &= A^2 \cos^2(t - \theta) + B^2 \sin^2(t - \theta)\end{aligned}\quad (3.2)$$

mit  $t$  = Richtung der Tunnelachse.

Die in vorstehender Abbildung dargestellten zweidimensionalen Abweichungen  $\sigma_Q$  und  $\sigma_L$  der Halbachsen  $A$  und  $B$  werden im Falle der Hinzunahme einer Punkthöhe (Achse  $C$ ) zu einem dreidimensionalen Konfidenzellipsoid. Zusammen mit den drei zugehörigen Drehwinkeln und dem Azimut der Tunnelachse können daraus die drei Standardabweichungen bezogen auf die Vortriebsrichtung  $\sigma_Q$ ,  $\sigma_L$  und  $\sigma_Z$  abgeleitet werden.  $\sigma_Z$  bezeichnet dann die Standardabweichung für die Punkthöhe als dritte Dimension. Im schon erwähnten Programm Panda finden die Höhenabweichungen bei den Simulationsberechnungen Berücksichtigung. Weitere Ausführungen finden sich in (NIEMEIER 1985).

Im Kapitel 7, Simulationsberechnungen, wird der Nachweis geführt, wie sich der einfache Polygonzug der Abbildung 3.49 im Vergleich zum Messnetz für die autonome Rohrvortriebsvermessung (Abbildung 3.53) auf den Durchschlagsfehler auswirkt. Die Netzvarianten der Abbildungen 3.51 und 3.52 werden nicht in den Vergleich mit einbezogen, da eine Netzanordnung in dieser Form auf Grund der kleindimensionierten Rohrdurchmesser in der Regel nicht umgesetzt wird.

Neben der Genauigkeit ist die Zuverlässigkeit der Beobachtungen, d. h. der Messungen zu berücksichtigen. Hierfür sind unabhängige Mehrfachmessungen von z. B. Verbindungsmessungen in Tunnelnetzen vorzusehen. Dazu gehören geometrisch anders wirkende Beobachtungen wie z. B. die Kombination von unabhängigen Strecken- und Winkelmessungen. Durch die zusätzlichen Überbestimmungen oder überflüssigen Beobachtungen wird gewährleistet, Unstimmigkeiten aufzudecken.

Als Beispiel für die Zuverlässigkeit dient eine Neupunktbestimmung des Punktes  $N$  von zwei Festpunkten  $P_1$  und  $P_2$  (NIEMEIER 2008).

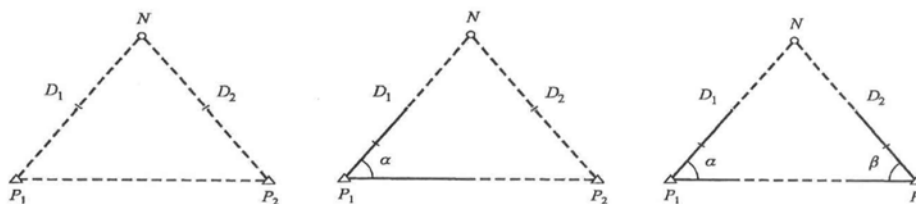


Abb. 3.55: Beispiele für die Zuverlässigkeit von Beobachtungen bei einer Punktbestimmung (NIEMEIER 2008)

Durch die Messungen der Strecken  $D_1$  und  $D_2$  von den Festpunkten  $P_1$  und  $P_2$  im linken Bild der obigen Abbildung 3.55 ist der Neupunkt  $N$  zwar ausreichend bestimmt, jedoch nicht kontrolliert, da eine fehlerhafte Streckenmessung zu falschen Koordinaten für  $N$  führt. Eine Wiederholungsmessung ohne Neuaufstellung bedeutet keine unabhängige Kontrolle.

Ist  $n$  die Anzahl der Messungen,  $u$  die Anzahl der Unbekannten (in diesem Fall die Lagekoordinaten) und die Redundanz  $r$ , so ergibt sich für dieses Beispiel mit  $n = 2$ ,  $u = 2$  eine Redundanz  $r$  nach:

$$r = n - u \quad (3.3)$$

zu

$$r = 2 - 2 = 0$$

Eine Redundanz 0 bedeutet keine Kontrolle. Eine zusätzliche Winkelmessung ( $\alpha$ ) im Festpunkt  $P_1$  erhöht die Anzahl  $n = 3$ ,  $u = 2$  verändert sich nicht. Die Redundanz ergibt sich damit nach (3.1) zu  $r = 1$ . Das bedeutet, dass eine Kontrolle möglich ist und eine fehlerhafte Beobachtung erkannt werden kann. Erst durch die Hinzunahme des Winkels  $\beta$  ist eine fehlerhafte Beobachtung lokalisierbar, wenn es sich nur um eine fehlerhafte Beobachtung handelt. Mit  $n = 4$  und  $u = 2$  erhält man wiederum nach (3.1) eine Redundanz  $r = 2$ , was als zuverlässiges System bezeichnet werden kann.

Für die Anlage von Tunnelnetzen gilt daher, dass bei großer Redundanz fehlerhafte Beobachtungen erkennbar sind und der Einfluss von nicht entdeckten kleinen groben Fehlern auf die Koordinierung von Tunnelnetzpunkten gering ist. Im Kapitel 7 werden die Tunnelnetze daraufhin bewertet.

### 3.9 Kreismessungen

Alle aufgeführten Netze sind einseitig angeschlossen. Polygonzüge sind oftmals nur die einzige Möglichkeit, die Aufgabe der Übertragung von Richtung und Koordinaten zur Vortriebsmaschine durchzuführen. In Beziehung auf die Fehlerfortpflanzung wirkt sich dieser Polygonzug ungünstig aus. Zusätzliche Bedeutung liegt in der Problematik der Refraktion (HENNES 1998, HENNES 2002). Bei den Strecken- und Richtungsmessungen im Tunnel treten vertikale und horizontale Lichtstrahlbrechungen auf, bedingt durch inhomogene Felder der Lufttemperaturgradienten, Luftfeuchtigkeit, Luftströmungen- und verwirbelungen. Die Refraktionseinflüsse übersteigen vielfach die Instrumentengenauigkeiten. Eine besondere Einflussgröße ist die Horizontalrefraktion, die hauptsächlich durch den horizontalen Temperaturgradienten der Tunnelatmosphäre geschuldet ist (BRYN und OSADA 2011).

KORITKE (1997) stellt verschiedene Modelle der Horizontalrefraktion vor. Die günstigste Variante mit dem geringsten Einfluss von Horizontalrefraktionen ist der gestreckte mittige Polygonzug (Abbildung 3.49). Bei Messungen über wechselseitige Konsolen ergeben sich symmetrische Refraktionen. Unterschiedliche Konsolen in Design, Tunnelwandabständen und Instrumentenhöhen führen zu unsymmetrischen Refraktionen (Abbildung 3.56). Eine Untersuchung von durchschnittlichen Isothermen aus Temperaturmessungen verdeutlicht in anschaulicher Weise diesen Sachverhalt.

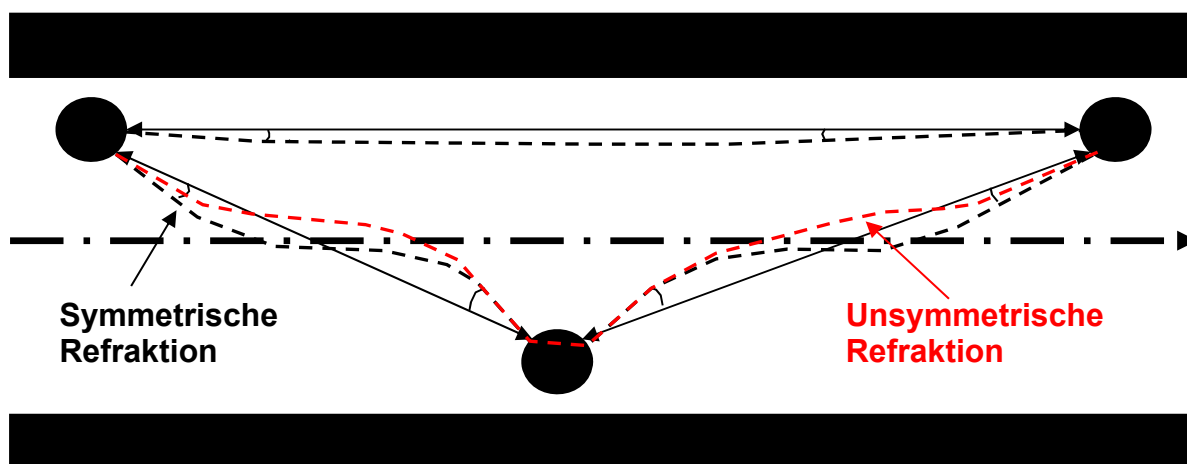


Abb. 3.56: Richtungsfehler verursacht durch Refraktion (nach KORITKE 1997)

KORITKE (1997) führt weiter aus, dass nach RINNER (1976) die Visuren im Tunnel zur Minderung des Horizontalrefraktionseinflusses einen Mindestabstand von den Tunnelwänden von 2m haben sollten, was zu einer Tunnelvermessung mittels einfachem Polygon-

zuges führt und einem Tunneldurchmesser von ca. 4m entspricht. In der Praxis kann diese Forderung nicht immer erfüllt werden. Sie richtet sich nach den Vorgaben im Tunnelprojekt.

Der Vermessungskreisel ist für die Verbesserung der Orientierung der Polygonzüge respektive der Polygonnetze in langen Vortrieben oftmals die einzige Möglichkeit zur unabhängigen Stützung. Er stellt auf Grund eines anderen physikalischen Prinzips eine effektive Alternative zur Aufdeckung von Messungenauigkeiten dar. Mit dem Vermessungskreisel werden unabhängige Azimute gemessen. Die Kreiselachse versucht dabei, sich durch Rotation parallel zur Drehachse der Erdachse auszurichten.

Der Vermessungskreisel erfüllt damit die Aufgabe, an jeder beliebigen Stelle Azimute von Polygon- bzw. Netzseiten zu bestimmen und damit die Richtung zu stabilisieren (SCHÄTTI 2006). Die Genauigkeit liegt bei heutigen Vermessungskreiseln wie z. B. beim Gyromat 5000 bei 0,8mgon (DMT 2013). Daraus ergibt sich eine Bogenabweichung  $B$  bei einer Streckenlänge  $S$  von 1 km und bei einem  $f_\alpha$  von 0,8mgon zu:

$$B = \frac{S \cdot f_\alpha}{\rho} = \frac{1 \cdot 0,8}{\frac{200}{\pi}} = 1,2 \text{ cm.} \quad (3.4)$$

Die zukünftige Nutzung des Tunnelbauwerkes beeinflusst zudem die Anforderung an die Genauigkeit der Tunnelauffahrung. In Tunnelbauprojekten für Hochgeschwindigkeitseisenbahnen ist die Einhaltung der geplanten Tunnelachse von wenigen Zentimetern erforderlich, da kleine Abweichungen schon zu Mehrkosten führen können, nicht nur beim Bau, sondern auch im anschließenden Fahrbetrieb (BENECKE und SCHULTHEISS 2010).

In Kanalbaumaßnahmen ist die Höhe ein wichtiger Parameter für den Vortrieb, aber auch die Einfahrt in den Zielschacht mit vorgegebenen Toleranzen führt zu erhöhtem Messaufwand, wenn z. B. die Einfahrt im Grundwasser liegt. Dann ist die Einfahröffnung in den Schacht so schmal wie möglich zu planen, was zu geringeren Toleranzen führt.

Eine Kreismessung ist so frühzeitig einzuplanen, dass auf Grund des Kreismessergebnisses genügend Zeit und eine ausreichend lange Vortriebsstrecke für eine Korrekturfahrt vorhanden ist. Eine abrupte bzw. zu starke Verschwenkung hin zur Sollachse auf einer kurzen Strecke führt automatisch zu Beschädigungen in den Rohren. Neben Haarrissen und Fugenklaffen können auch die Rohre so schadhafte werden, dass sie den Anforderungen aus dem Bauauftrag nicht mehr genügen.

### 3.10 Aufbau von Vermessungspunkten im Rohrstrang

Die Vortriebsnetze im Tunnel erfordern einen Aufbau von Messpunkten, die für den jeweiligen zu bauenden Rohrstrang optimal angepasst sind. Kommen Polygonzüge wie in den Abbildungen 3.49 und 3.50 zur Ausführung, werden die Tachymeterstandpunkte über normale Stative (Abbildung 3.57) messtechnisch verbunden, insbesondere dann, wenn der Rohrdurchmesser gering ist wie bei Durchmessern von DN1600. Mitunter werden Ministative eingesetzt, damit in Kombination mit der Kippachshöhe des Tachymeters eine möglichst mittige Position aus Refraktionsgründen im Rohr erreicht werden kann. Die Gefahr bei dieser Art des temporären Messpunktaufbaus besteht allerdings darin, dass beim Passieren der Stative durch das Messpersonal eine Berührung auf Grund der beengten Verhältnisse nicht ausgeschlossen werden kann. Nur eine einzige Berührung hat zur Folge, dass sich das Stativ in Lage und Höhe verschiebt. Die Stativbeine sollten von daher standsicher aufgestellt werden. Dafür kann z. B. die Fuge zwischen zwei benachbarten Betonrohren genutzt werden, um hier zwei der drei Stativbeine festzusetzen. Das dritte Bein wird möglichst steil aufgebaut, um ein Verrutschen zu verhindern. Ein Aufrauhen der Betonfläche oder gar eine Körnung für den sichereren Halt des Beines ist in Kanalbauprojekten bei der Emschergenossenschaft zu unterlassen, da eine Beschädigung des Rohres verhindert werden muss.

Die Polygonzugmessung muss im Falle einer Lageveränderung von den Messpunkten bzw. Stativen an wiederholt werden, die unverändert geblieben sind, sofern alle Messpunkte bis zur Vortriebsmaschine vorab in einem Guss aufgebaut worden sind. Werden nur drei Stative

eingesetzt, d. h. ein Stativ für das Tachymeter und zwei Messprismenstative, muss die gesamte Messung von Beginn an wiederholt werden.



Abb. 3.57: Herkömmliches Stativ mit Tachymeter



Abb. 3.58: Messpunktaufbau mittels Messstütze

Alternativ zum Aufbau der Messpunkte mit herkömmlichen Stativen bieten sich Messpunktstützen an, die zwischen der Sohle und dem First gespannt werden. Auf der seitlich angebrachten Konsole wird das Tachymeter bzw. werden die Messprismen aufgesetzt (Abbildung 3.58). Nach Beendigung kann die Stütze bei entsprechendem Platz seitlich für den nächsten Messeinsatz gelagert werden. Im Falle einer Lorenzförderung (Kapitel 2.1.2) muss gewährleistet sein, dass die Lore frei im Rohr fahren kann.

Mit größer werdenden Rohrdurchmessern können die in den Abbildungen 3.51 und 3.52 dargestellten Netze durch seitlich an den Tunnelinnenwänden festinstallierter Messpunkte z. B. in Form von Konsolpunkten ausgestattet werden. Die festinstallierten Messpunkte sind wie schon gesagt, beim Rohrvortrieb ebenfalls als temporär zu betrachten, da nach der Kontrollvermessung, die im ruhenden Zustand durchgeführt wird, der Rohrstrang durch den Pressvorgang weiterbewegt wird. Die Koordinaten der Messpunkte haben dann sofort keine Gültigkeit mehr.

Die Konsolen werden entweder in der Tunnelwand durch schon im Betonwerk eingebaute Dübel oder an Spannringen befestigt. Spannringe kommen in Tunneln mit kleineren Durchmessern zum Einsatz. Sie sind eine Möglichkeit, ohne Beschädigung des Betonrohres eine feste Halterung für Messkonsolen zu schaffen.

Die Konsolen sollen mit möglichst langen Auslegern zur Aufnahme der Messinstrumente ausgestattet sein. Je länger der Konsolenausleger, desto weiter ist das Messinstrument von der Rohrwand entfernt. Bei gleichen Auslegerlängen der Konsolen ergeben sich gleiche Umgebungstemperaturen im Bereich des Betonrohres. Eine gewisse Beabstandung ist zudem wegen der seitlich an den Rohrwänden verlaufenden Leitungen und Kabeln für die Infrastruktureinrichtungen vorzusehen.

Die Konsolen können starr oder auch beweglich ausgestattet werden. Das erfolgt durch verschiebbare (Abbildung 3.59) oder auch schwenkbare Konsolenelemente. Die Konsolen können wechselseitig oder gegenüberliegend montiert werden, wie es in den Beispielen der Abbildungen 3.51 und 3.52 für die entsprechenden Vortriebsnetze erforderlich ist.



Abb. 3.59: Verschiebbare Konsole am Spannring, Baustelle Emschergenossenschaft, Eigenentwicklung

Je nach Rohrinfrastruktur können Firstkonsolen (Abbildung 3.60) an Spannringen eingebaut werden. Das Tachymeter wird mit dem Dreifuß in die Firstkonsole eingesetzt. Bei einer

eingetretenen Verrollung kann der Spannring nachjustiert werden, wenn der Dreifuß die Grenze seines Horizontierbereiches erreicht hat.

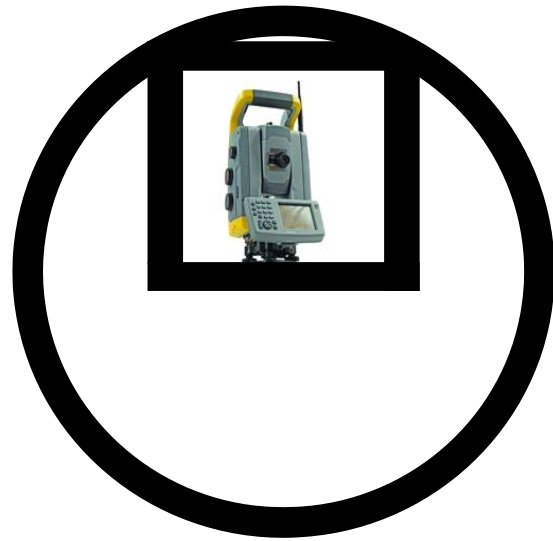


Abb. 3.60: Firstkonsole, Eigenentwicklung Emschergenossenschaft,

Liegen Tunnel mit Durchmessern von mehreren Metern vor und ist ausreichender Platz für einen Loren- bzw. Bahnbetrieb vorhanden, können Vermessungspfeiler, auch wechselseitig, eingebaut werden (Abbildung 3.61). Der Vorteil liegt darin, dass der Aufbau von Stativen entfällt und durch den Vermessungspfeiler eine hohe Stabilität gewährleistet ist. Verfahrensbedingt können Vermessungspfeiler nur in Tübbingstrecken eingebaut werden. Im Emscherprojekt finden Messpfeiler im Tunnel auf Grund der geringen Rohrdurchmesser keine Anwendung.

Der Aufbau und die Platzierung von Vermessungspunkten sind bei allen Varianten zeitaufwendig und kostenintensiv und bedürfen einer guten Planung.



Abb. 3.61: Vermessungspfeiler seitlich der Gleisanlage (LEICA 2012)



### 4. Rohrvortriebskontrollvermessungen

In den vorherigen Kapiteln wurden die Grundlagen besprochen, um einen Einblick über die vorlaufenden Vermessungsarbeiten zu bekommen, bevor die Aufgaben der Rohrvortriebskontrollvermessungen im Weiteren thematisiert werden.

Hauptaufgabe der Ingenieurvermessung beim Rohrvortrieb bzw. Tunnelbau ist nach wie vor die baubegleitende Absteckung des Tunnels und somit die Angabe der Vortriebsrichtung an der Ortsbrust (STENGELE 2007).

Die Überprüfung der richtigen Lage und Höhe der Tunnelvortriebsmaschine erfolgt durch eine Rohrvortriebskontrollvermessung. Hierbei handelt es sich um eine in Intervallen durchzuführende Vermessung des Rohrstranges bzw. eine Einmessung des für die Steuerung der Vortriebsmaschine notwendigen Navigationssystems. Das Ergebnis der Kontrollvermessung führt zur Kenntnis der Position der Vortriebsmaschine im Vortriebsnetz zum Zeitpunkt der Messung. Mit den zu diesem Zeitpunkt festgestellten etwaigen Abweichungen zur Sollachse ergeben sich die Korrekturwerte für das Navigationssystem. Die Vortriebsmaschine wird nach der Kontrollvermessung mit den neuen Werten ausschließlich durch das Navigationssystem bis zur nächsten Kontrollvermessung weitergesteuert. Demzufolge ist zwischen einer Vortriebskontrollvermessung in Intervallen und einer permanenten Vermessung durch das Navigationssystem zu unterscheiden.

Könnte sich die Maschine fehlerfrei durch den Untergrund schieben, würden keine Korrekturwerte benötigt. Auf Grund der Gebirgsverhältnisse, der Maschinendrift, den Verrollungen usw. kann die Maschine ihre Sollfahrt in der Regel aber nicht einhalten. Mittels verschiedener steuerbarer Einrichtungen wie z. B. Bohr- und Steuerköpfe kann auf festgestellte Abweichungen von der Planungsachse in Lage und Höhe reagiert werden. Um eine Beschädigung der Rohre zu vermeiden, ist ein angepasstes Reagieren erforderlich, d. h. abrupte Richtungswechsel und Kurskorrekturen müssen unbedingt vermieden werden. Sicht- und unsichtbare Rissbildungen (Haarrisse) beeinträchtigen die Qualität der Rohre und vermindern die Lebensdauer des Bauwerkes erheblich, wie oben erwähnt.

Der Vortrieb ist demzufolge neben der Erfassung der Lage und Höhe ständig zu überwachen, was durch die Aufzeichnung von Maschinendaten wie Vortriebsgeschwindigkeiten, Vortriebskräfte der Haupt- und Zwischenpressstationen, der Verrollung und die Erfassung der Menge der Stütz- und Gleitmittel für die Ringspaltverfüllung erreicht wird. Die weiteren möglichen Maschinendaten wie Druckzustände für das Hydraulik- und Fördersystem bei hydraulischen Förderungen können ebenso überwacht werden wie der Luftdruck und -menge bei Vortrieben unter Druckluft (MAIDL ET AL. 2011).

Der Rohrvortrieb unterscheidet sich, wie schon erläutert, im Gegensatz zu einem Tübbingvortrieb (Kapitel 2.1.3) dadurch, dass sich das gesamte Bauwerk beim Vortrieb in ständiger Bewegung befindet. Das hat für die Kontrollvermessung den Nachteil, auf keine festen Messpunkte und auf Koordinaten aus Vormessungen zurückgreifen zu können. Die Lage wird durch die 3D-Koordinate (X,Y,Z) beschrieben (Abbildung 4.1). Die Richtung der Vortriebsmaschine besteht aus 3 Richtungen, dem Vertikalwinkel zwischen der Schildachse und der Planungs- bzw. Rohrachse, dem Horizontalwinkel zwischen der Schildachse und der Rohrachse und dem Verrollungswinkel. Hierunter versteht man den Drehwinkel um die eigene Achse (STEIN 2003).

Vor Baubeginn ist zwischen dem Bauherrn und der Baufirma vertraglich festzulegen, wer Rohrvortriebskontrollvermessungen in welchen Intervallen durchzuführen hat. Der Bauherr kann z. B. die gesamte Verantwortung während der Bauausführung der Baufirma überlassen und erwarten, nach Fertigstellung ein Bauwerk zu erhalten, welches den Planungen und Qualitätsanforderungen entspricht. Eine andere Variante ist, eine für bestimmte Bauzustände durchzuführende Kontrolle selbst vorzunehmen.

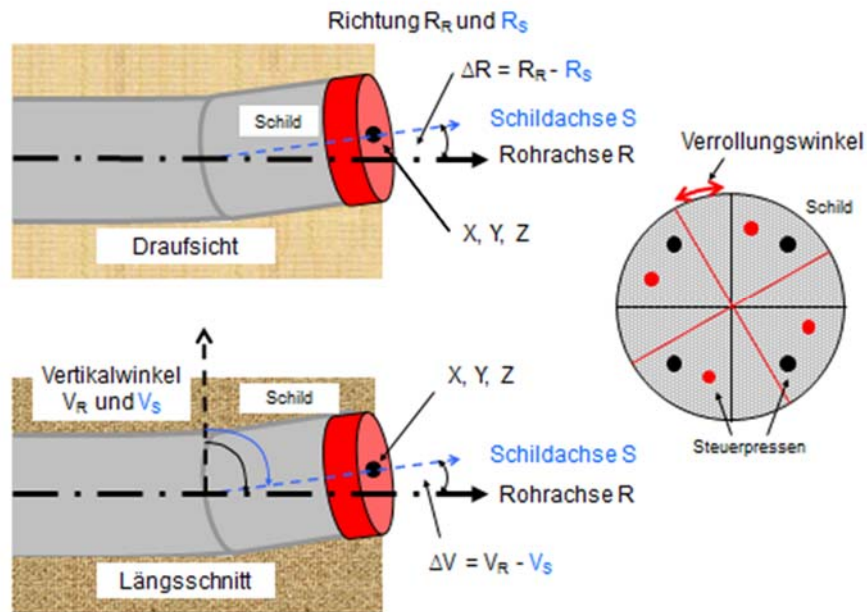


Abb. 4.1: Prinzipdarstellung 3D-Lage der Vortriebsmaschine

### 4.1 Herkömmliche Rohrvortriebskontrollvermessungen

Die im Kapitel 3.8 beschriebenen Vortriebsnetze bzw. die Netzknoten werden durch Polygonzugmessungen koordiniert. Bei dem einfachen Polygonzug werden die Messpunkte nacheinander, wie erwähnt, durch wechselseitige Besetzung mit Tachymetern und Prismen vermessen. Die Polygonzugmessung bei den Polygonnetzen erfolgt wechselseitig (linke bzw. rechte Tunnelwand) mit Einbeziehung benachbarter Messpunkte. Dadurch findet eine Stützung bzw. Überbestimmung statt. Es bleibt aber im Grundsatz ein Polygonzug. In den nachstehenden Abbildungen 4.2 bis 4.4 ist im Aufriss ein Beispiel eines einfachen Polygonzuges dargestellt. Beginnend mit der Herablegung durch Steilvisuren unter Einbeziehung von Stützpunktprismen wird ein im Tunnelrohr auf einem Stativ sitzendes Prisma eingemessen. Im weiteren Verlauf finden die zuvor genannten wechselseitigen Besetzungen mit Tachymeter und Prismen statt. Zum Ende hin werden die Messprismen aus dem Navigationssystem für die Vortriebssteuerung (Kapitel 4.3) in den Messprozess einbezogen. Damit liegen die Koordinaten des Tachymeters und der Messprismen des Navigationssystems im Vortriebsnetz und damit im übertragenden Grundlagnetz vor. In Ergänzung hierzu können die z. B. letzten 10 einzelnen Rohre vor der Vortriebsmaschine in ihren Anfangs- und Endpunkten bestimmt werden, was einen Soll-Ist-Vergleich zur geplanten Trassierung ermöglicht.

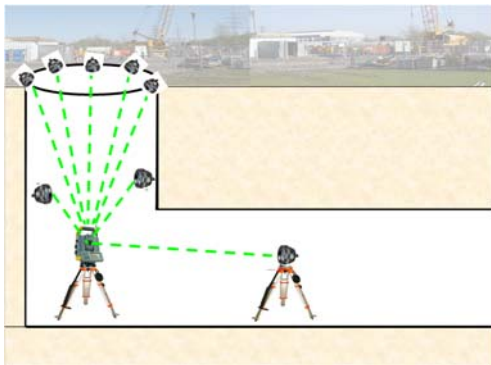


Abb. 4.2: Herablegung zu Beginn des Polygonzuges

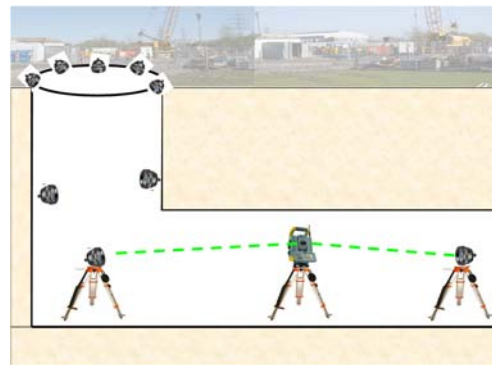


Abb. 4.3: Fortführung Polygonzugmessung

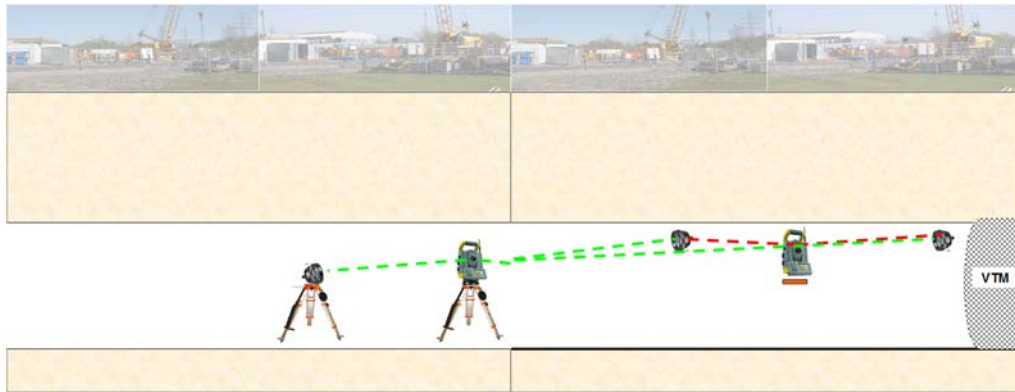


Abb. 4.4: Ende Polygonzugmessung mit Anbindung an das Navigationssystem

### 4.2 Rohrvortriebskontrollvermessungen im Emscherprojekt

Die Steuerung der Vortriebsmaschinen erfolgt verfahrensbedingt durch unterschiedliche Navigationssysteme. Daraus ergeben sich verschiedene Kontrollintervalle, die sich über einen Bereich von 30m bis 120m erstrecken (Kapitel 4.3). Die Intervalle werden zwischen dem Bauherrn und der Baufirma vertraglich geregelt und sollen helfen, ein qualitätsgesichertes Bauwerk zu erhalten.

Die EmscherGenossenschaft hat in den Bauverträgen für den Auftragnehmer folgende Kontrollmessintervalle vereinbart:

- a.) Aufmaß der Vortriebsmaschine nach Einbau in der Pressgrube nach Lage und Höhe. Dabei werden fest definierte Stellen an oder auf der Maschine eingemessen. Die Umrechnung auf diverse Bezugspunkte für den Vergleich zwischen Soll- und Istlage der Tunnelvortriebsmaschine erfolgt über die technischen Maschinendaten. Alternativ können die Schienen, auf denen die Schildwiege gesetzt wird, nach Lage- und Höhe vor Maschineneinbau koordinatenmäßig erfasst werden. Liegt die Schildwiege schon auf den Schienen, kann diese 3D-mäßig an expliziten Stellen erfasst und mit den Vorgaben abgeglichen werden (Abbildung 4.5). Das Aufmaß erfolgt aus dem herabgelegten Portalnetz unter Einbeziehung der an der Schachttinnenwand montierten Messprismen.
- b.) Eine erste Kontrollvermessung des Rohrstranges erfolgt nach ca. 15m Vortrieb.
- c.) Danach sind Kontrollvermessungen alle 40m Vortrieb durchzuführen.
- d.) Zur Überprüfung des Aufmaßes des Rohrstranges sind Vergleichsstationen alle 100m einzumessen.
- e.) Einmessung diverser Punkte an der Vortriebsmaschine oder Messeinrichtungen für die Maschinensteuerung entsprechend dem jeweiligen Navigationssystems.

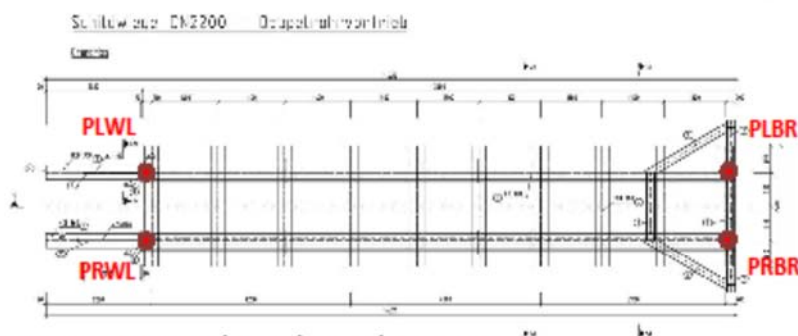
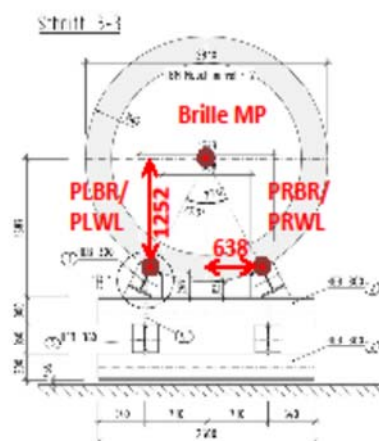
Für die auftraggeberseitigen Kontrollvermessungen wurden folgende Intervalle vereinbart und im Bauzeitenplan berücksichtigt:

- a.) Einmessung der Tunnelvortriebsmaschine nach Einbau in der Pressgrube bzw. der Schildwiege
- b.) Kontrollvermessung nach 40m Vortrieb.
- c.) Danach alle 200m mit Messungen von Vergleichsstationen.

Die Einmessungen der Vortriebsmaschinen bzw. der Schildwiegen nach Einbau in der Pressgrube und vor Vortriebsbeginn sind vorlaufende Vermessungsarbeiten, die zu den Rohrvortriebskontrollvermessungen zu zählen sind.

### Kontrollvermessung Brille & Schildwiege

Bezugskordinaten			
Punkt	Rechts [m]	Hoch [m]	Höhe [m]
1000	32677,605	680990,890	40,059
2000	32674,579	681005,369	40,061
3000	32692,123	681009,252	40,093
4000	32692,747	680991,251	40,070
68904	32673,272	681000,880	40,078
68905	32681,209	681011,066	40,063
68906	32696,608	681001,837	40,080
68907	32694,961	680993,890	40,078
68908	32684,983	680988,225	40,061



Alle Angaben zur Ablage beziehen sich auf die Lage und Höhe der Vortriebsachse in Vortriebsrichtung.

Ø Betonrohr 1100mm (innen)

Angaben zur 3D-Raumachse							
Punkt		Ablage Lage [mm]	Ablage Höhe [mm]	RW	HW	Höhe	
Brille MP	Mittelpunkt	-4	-14	32693,275	680995,129	19,484	
N1	Nagel	-7		32673,933	680998,205		
N2	Nagel	-2		32694,642	680994,911		
PRWL	s.o.	636	-1270	32692,237	680995,941	18,207	
PLWL	s.o.	-641	-1266	32679,930	680997,894	18,211	
PRBR	s.o.	632	-1264	32692,036	680994,682	18,232	
PLBR	s.o.	-642	-1261	32679,724	680996,634	18,207	
PRWL	IST-SOLL	-2	-18				
PLWL		-3	-14				
PRBR		-6	-12				
PLBR		-4	-9				

Abb. 4.5: Beispiel einer Schildwiegeeinmessung, Baustelle Emschergenossenschaft

### 4.3 Vortriebssteuerung durch verschiedene Navigationssysteme

Die Ermittlung der Lage und Höhe der Vortriebsmaschine basiert auf Referenzpunkten in einem Maschinenkoordinatensystem, welches in Bezug zum Vortriebsnetz gesetzt wird. Unterstützt wird die Maschinensteuerung durch ein Navigationssystem, welches u. a. aus Tachymeter mit einer automatischen Zielverfolgung, aus Lasern, Zieltafeln, Prismen und Inklinometern besteht. Nachfolgend wird eine Auswahl verschiedener Navigationssysteme vorgestellt.

Starre Laser und Zieltafeln kommen in geraden Vortrieben zum Einsatz. Kreiselbasierte Systeme mit Schlauchwaage bieten eine weitere Möglichkeit der Vortriebssteuerung (MAIDL ET AL. 2011) und (PLACZEK ET AL. 2016).

#### 4.3.1. Navigation bei gerader Trassierung

Der einfachste Anwendungsfall für eine Vortriebsmaschinensteuerung ist ein gerader Tunnelverlauf. Zu den Messeinrichtungen gehört ein Laser (Abbildung 4.6), der sich im Startschacht befindet und auf eine elektronische Zieltafel, befestigt an der Vortriebsmaschine, gerichtet ist (gerichteter Laser mit elektronischer Zieltafel). Daher ist ein Freiraum im Rohrstrang vorzuhalten. Die Stationierung erfolgt über ein Wegmessrad (Abbildung 4.7), welches im Startschacht montiert ist und auf dem Scheitel des Vortriebsrohres aufliegt. Mit diesem System sind Vortriebslängen von ca. 200m zu erreichen.



Abb.4.6: Elektronisches Lasersystem bei gerader Trassierung (HERRENKNECHT AG 2007)



Abb. 4.7: Wegmessrad zur Stationierung des Vortriebes (HERRENKNECHT AG 2007)

Das System kommt mit wenigen Komponenten aus und ist ein günstiges System. Dadurch, dass sich die Hauptkomponenten in der Pressgrube und in der Vortriebsmaschine befinden, sind zusätzliche Installationen im Rohrstrang nicht erforderlich. Mögliche Bewegungen im Schacht und Refraktionseinflüsse erfordern eine erste Kontrollvermessung nach einem Vortrieb von 30m und danach im Abstand von 50-80m (PLACZEK ET AL. 2016).

In Ergänzung zum vorherigen System erweitert sich dieses System bei geradem Tunnelverlauf durch die Nutzung einer elektronischen Schlauchwaage (Abbildung 4.8), die heutzutage im grabenlosen Leitungsbau Anwendung findet (gerichteter Laser mit elektronischer Zieltafel und elektronischer Schlauchwaage). Dabei wird eine Schlauchleitung im gesamten Rohrstrang mitgeführt. Sie verbindet den Hözensensor in der Vortriebsmaschine mit dem Referenzmodul im Startschacht. Die Vortriebslänge erhöht sich damit auf ca. 400m. Refraktionen im Tunneleingangsbereich bedingen regelmäßige Kontrollvermessungen.



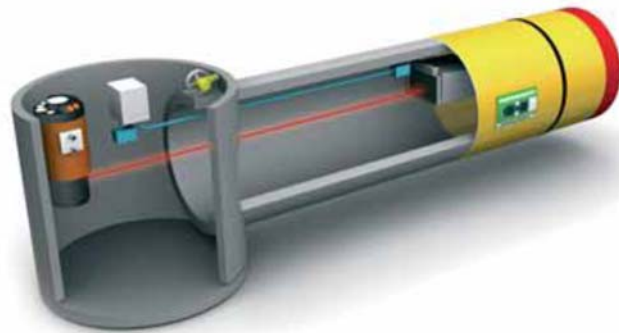


Abb. 4.8: Elektronisches Lasersystem mit elektronischer Schlauchwaage (HERRENKNECHT AG 2007)

#### 4.3.2. Navigation bei gekrümmtem Trassenverlauf

Das System SDV13 ermöglicht horizontal und vertikal krümmte Rohrvortriebe (CENTERLINE GMBH 2005). SDV steht für Systeme und Datenerfassung und Vortriebssteuerung. Die Hauptkomponenten sind ein nordsuchender Kreiselkompass, eine elektronische Zieltafel und eine elektronische Schlauchwaageeinheit (Abbildung 4.9).

Das Kreiselssystem misst den Winkel zwischen der Vortriebsmaschinenachse und der geographischen Nordrichtung. Die Höhenmessung erfolgt mit der Schlauchwaage. Mögliche Verrollungen sowie die Längsneigung der Vortriebsmaschine erfassen zwei Inklinometer. Ein Wegmessrad ermittelt die jeweilige Station.

Der Kreisel kann nicht die Driftbewegungen feststellen. Infolge dessen muss, weil der Driftwinkel durch Radienwechsel und bei fortschreitendem Vortrieb größer wird, die Lage der Maschine durch eine Kontrollvermessung überprüft werden. Messintervalle von 30 bis 40m sind hierfür einzuhalten.

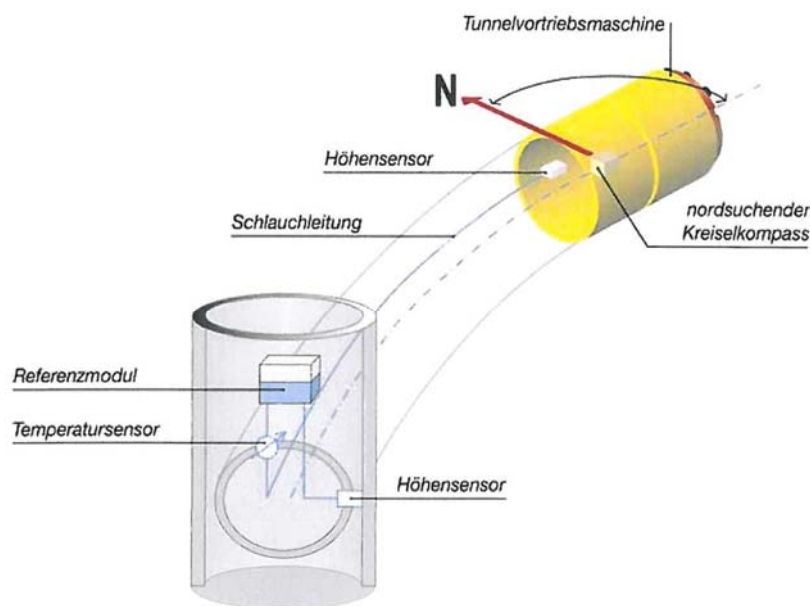


Abb. 4.9: SDV13, System zur Datenerfassung und Vortriebssteuerung (CENTERLINE GMBH 2005)



### 4.3.3 Navigation mit mitfahrenden Messstationen, automatisierter Polygonzug

Die mitfahrenden Messstationen (Abbildung 4.10) bestehen jeweils aus selbstsuchenden Tachymetern, automatischen Dreifüßen und Vorrichtungen für Messprismen und bilden zusammen das automatische Tunnelbau-Führungssystem TUMA (MARX 1989). Zum Einsatz ist das Führungssystem beim Bau des Eurotunnels zwischen England und Frankreich gekommen (JACOBS 1991b). Der Messvorgang dieser automatischen Polygonzugmessung beginnt im Startschacht mit der Orientierung und Koordinatenbestimmung des ersten Tachymeterstandpunktes (Abbildung 4.11) über im Schacht montierte und aus dem übertägigen Netz bestimmte Messprismen. Weitere Messstationen werden auf Konsolen in den Rohrstrang eingebaut, so, dass die Tachymeter untereinander immer Sichtverbindung haben und sich gegenseitig im Vortriebsstillstand anzielen und einmessen. Konsolen werden in Abhängigkeit vom Tunneldurchmesser und Trassenverlauf positioniert (Abbildung 4.12). Im Bereich der Vortriebsmaschine befinden sich Messprismen, die im Verbund mit Neigungsmessern (NM) die Grundlage für die Bestimmung und Berechnung der Lage und Höhe sowie der Verrollungen der Vortriebsmaschine bilden. Der Installationsaufwand ist sehr hoch. Jede weitere Verlängerung der Vortriebsstrecke erfordert ein zusätzliches Tachymeter (PLACZEK ET AL. 2016). Auf Grund der hohen Anzahl von Tachymetern fallen hohe Miet- bzw. Anschaffungskosten an.

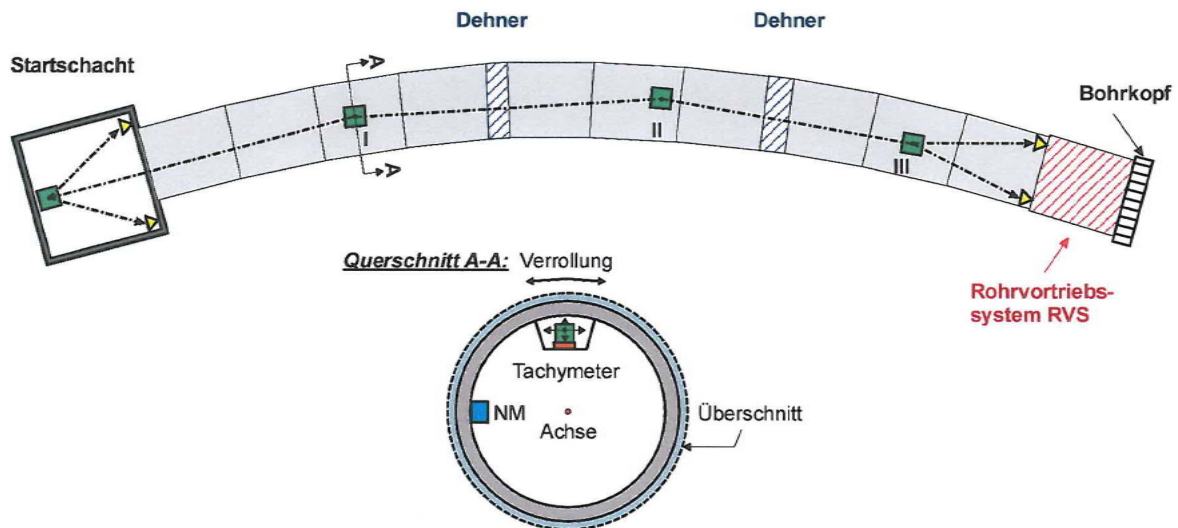


Abb. 4.10: Tunnelbau-Führungssystem TUMA (MARX INGENIEURGESELLSCHAFT MGH 2007)



Abb. 4.11: Tachymeterstandpunkt im Startschacht für TUMA (MARX INGENIEURGESELLSCHAFT MGH 2007)



Abb. 4.12: Weiterer Tachymeterstandpunkt im Tunnel für TUMA (MARX INGENIEURGESELLSCHAFT MGH 2007)

### 4.3.4 Mitfahrendes Lasertheodolitsystem mit elektronischer Zieltafel

Das mitfahrende Lasertheodolitsystem benötigt einen Lasertachymeter, das auf einem automatischen Dreifuß montiert ist, Inklinometer zur Erfassung von Verrollungen, eine aktive Zieltafel mit eingebautem Prisma zur elektronischen Streckenmessung sowie drei Messprismen. Zwei von diesen befinden sich im Abstand von ca. 10m vom Tachymeter entfernt vor der Vortriebsmaschine als Stützpunktprismen. Ein Prisma ist hinter dem Tachymeter (in Vortriebsrichtung gesehen) als Anschlussziel im Rohr befestigt (Abbildung 4.13).

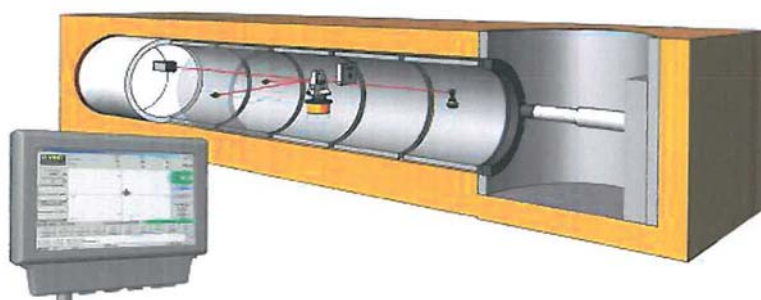


Abb. 4.13: Steuerleitsystem für Rohrvortriebe, SLS-RV (VMT-GMBH 2007)

Das Messsystem beruht auf der Annahme, dass der geschaffene Hohlraum der Vortriebsmaschine konstant bleibt und sich die folgenden Rohre auf der gleichen Raumkurve bewegen. Durch Unregelmäßigkeiten, bedingt durch Rohrfertigung, dem Überschnitt und durch den Baugrund ist die „Ortstreue“ nicht immer gegeben, so dass auf eine regelmäßige Kontrollvermessung nicht verzichtet werden kann. Die Kontrollvermessungen sollen je nach Trassierung in Intervallen von 60m bis 120m durchgeführt werden.

Welches Navigationssystem zum Einsatz kommt, richtet sich nach der Länge und den Trassierungselementen der geplanten Tunnelachse. Je nach System ergeben sich unterschiedliche Kontrollmessintervalle. Die Anzahl der Intervalle hat einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Vortriebs.

### 5. Neue Verfahren für Rohrvortriebskontrollvermessungen

In den vorstehenden Kapiteln wurde ein umfassender Überblick über die Beteiligung der Ingenieurgeodäsie in Rohrvortriebsprojekten gegeben. Gemäß der Bauprozessdarstellung (Kapitel 3) sind nach den Grundlagenvermessungen wie Geländeaufnahmen die weiteren Aufgaben die Absteckungen der überträgigen Grundlagen- und Portalnetze als Basis für die Vortriebsnetze thematisiert worden. Die Varianten für die Vortriebsnetze wurden in Abhängigkeit zu den Tunneldurchmessern dargestellt.

Der Grund für den Vortrieb von langen Haltungen mit Längen von bis zu 1.200 Metern liegt im Projekt „Umbau des Emschersystems“ darin, die hohen Kosten des Baues von Schächten zu reduzieren. Der für jede Haltung geplante Rohrdurchmesser ergibt sich aus hydraulischen Berechnungen. Die Dimensionierung der Haltungen mit Durchmessern von DN1600 auf mehreren Kilometern im genannten Projekt sowie in den Bauprojekten der Nebeneinzugsgebiete (Abbildung 2.2) führt, was die Rohrvortriebskontrollvermessungen anbelangt, zu der Frage, ob eine Entwicklung automatisierter Messverfahren zu einer wirtschaftlicheren Lösung führt und zugleich den Gesundheitsschutz und die Arbeitssicherheit stärkt.

Eine alltägliche Situation einer Kontrollvermessung in Rohren mit geringem Durchmesser zeigt die Abbildung 5.1. Der Mitarbeiter steht in ständig gebückter Haltung und ist dabei, das Tachymeter mit dem Stativ für die Messung aufzubauen. Diese Abbildung verdeutlicht eindrucksvoll, dass Handlungsbedarf besteht, die Belastungen durch neue Verfahren zu minimieren bzw. zu eliminieren.

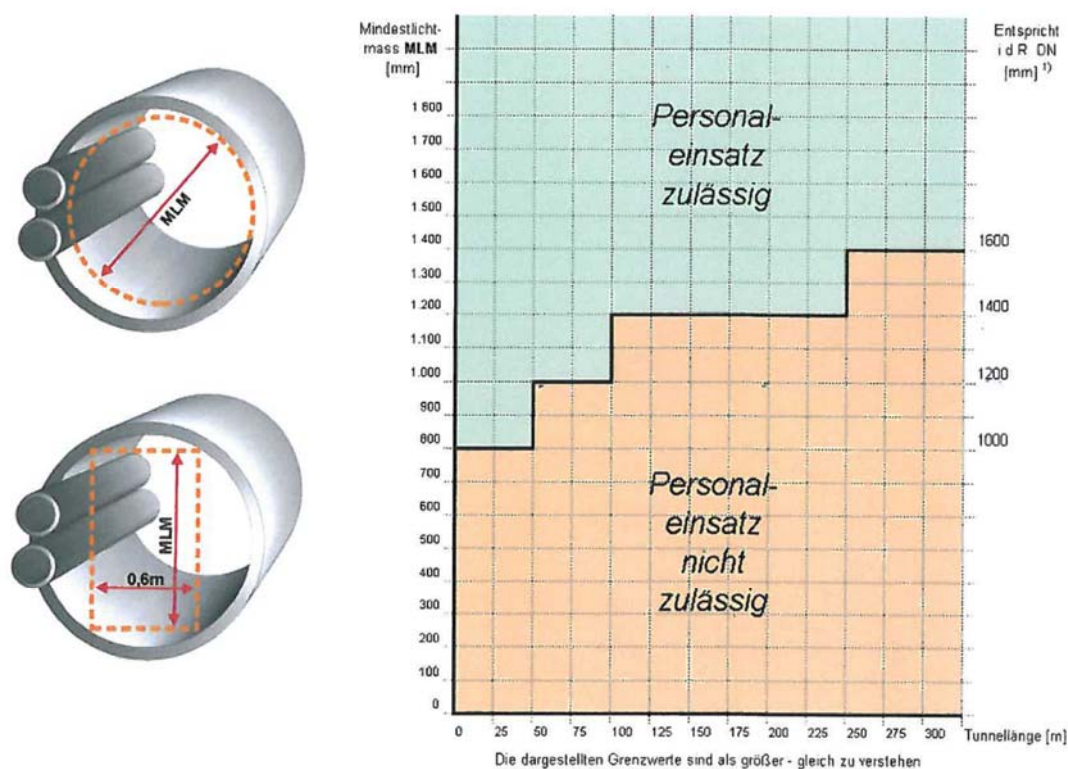


Abb. 5.1: Aufbau des Tachymeters im Rohrstrang DN 1600, Baustelle Emschergenossenschaft

Von geringen Durchmessern kann gesprochen werden, wenn ein Begehen des Rohrstranges nicht mehr in normaler senkrechter Stellung bei einem Mitarbeiter möglich ist.

Für das Begehen von Tunneln sind berufsgenossenschaftliche Regelungen und Vorschriften einzuhalten. Das ist schon zu Beginn der Planungsarbeiten für ein Tunnelbauwerk zu berücksichtigen. Die DGUV (1997) Vorschrift 38 definiert hierfür im §42 Mindestlichtmaße in Abhängigkeit von Durchmesser und Haltungslänge. Der Begriff Mindestlichtmaß beschreibt den freien nicht durch Einbauten eingeengten Querschnitt.

Im Arbeitsblatt der DWA-A125, Kapitel 7.1.4, Rohrvortrieb und verwandte Verfahren, werden die Mindestlichtmaße (Abbildung 5.2) dargestellt.



<sup>1)</sup> Entscheidend für die Auswahl der Rohrquerschnitte ist das in Abhängigkeit der Tunnellänge vorgegebene Mindestlichtmaß, die auf der rechten Achse aufgetragenen Rohrendurchmesser sind Erfahrungswerte und sind projektspezifisch zu überprüfen

Abb. 5.2: Mindestlichtmaße gemäß Arbeitsblatt DWA-A125

Für den Baustellenbetrieb bzw. für das Begehen der Haltungen durch das Baustellen- und Vermessungspersonal sind die Infrastruktureinrichtungen soweit seitlich an den Rohrwänden einzubauen bzw. zu befestigen, dass ein begehbarer Raum eine Breite von mindestens 60cm aufweist. Auf diesen Freiraum wird in einer der nächsten Kapitel noch einmal Bezug genommen, weil er einen grundlegenden Parameter für neue Messverfahren darstellt.

### 5.1 Erstes Alternativverfahren: Messfahrzeuge mit Elektroantrieb

Mit Hilfe eines Fahrzeuges führt das Messpersonal die Rohrvortriebskontrollvermessung in sitzender Position durch. Die körperlichen Beeinträchtigungen des Messpersonals bei der Begehung und Kontrollvermessung auf Grund von kleindimensionierten Rohren werden dadurch reduziert.

Ein Fahrzeug hat für die Anwendung im Rohrvortrieb mehrere Bedingungen zu erfüllen. Als Erstes ist die Fahrzeugbreite von entscheidender Bedeutung. Gemäß der Abbildung 5.2 beträgt die Mindestlichtraumbreite 60cm. Auf diese Breite beziehen sich die Baufirmen bei den einzubauenden Spann- und Halterungen für die Infrastruktureinrichtungen. Infolge dessen ist das zugrunde zu legende Maß für die Breite des Fahrzeuges diese Mindestlichtraumbreite.



Das entwickelte Fahrzeug (Abbildung 5.3) ist mit einem Elektromotor ausgestattet. Der Batterieantrieb verhindert die Bildung von Abgasen, die bei einem mit Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeug entstehen würden. Entsprechende Vorschriften hierfür regelt die DGUV Regel 101-007.

### Vermessungsarbeiten

Elektrofahrzeug im Einsatz, DN 1600



Abb. 5.3: Tunnelfahrzeug mit Elektroantrieb, Eigenentwicklung Emschergenossenschaft,

Die Fahrgeschwindigkeit beträgt ca. 6 km/h, eine gute Schrittgeschwindigkeit bei normaler Gehweise im Gelände. Im Tunnelrohr kann diese Gehgeschwindigkeit bei einem Durchmesser von 1,60m nicht erreicht werden.

Auf dem Fahrzeug sind Vorrichtungen für den Transport bzw. für die Mitnahme von Messprismen und Tachymeter vorgesehen. So ausgerüstet kann eine Vermessung im Rohrstrang erfolgen.

Das dazugehörige Messkonzept benötigt für eine Kontrollvermessung den Einsatz von zwei Fahrzeugen. Für eine ausreichende Beleuchtung hat die Baufirma zu sorgen. Das wird in den Bauverträgen geregelt.

Da das Fahrzeug den ganzen Freiraum (zumindest in Rohren mit einem Durchmesser von 1,60m) ausnutzt, müssen die Messpunkte für das Vortriebsnetz auf Konsolen platziert werden, die an Spannringen befestigt werden. Eine Befestigung mittels Bohrungen bzw. Verdübelungen an den Rohren ist in Abwasserkanalprojekten der Emschergenossenschaft nicht erlaubt. Die Spannringe mit den Konsolen verbleiben werden des gesamten Vortriebs im Rohr (mitfahrend). Nach Beendigung der Vortriebsarbeiten werden diese ausgebaut und für einen nachfolgenden Vortrieb zur Verfügung gestellt.



Abb. 5.4: Kontrollvermessung/Polygonzug über Konsolen, Einsatz im DN 1600, Baustelle Emschergerossenschaft

Die Konsolen sind verschiebbar ausgerüstet, um den Rohrrinnenraum gerade in Tunneln mit geringem Durchmesser möglichst frei zu halten. Verschiebbare Konsolen sollen dem Umstand Rechnung tragen, die Messeinrichtungen möglichst weit von der Rohrrinnenwand aus Gründen der Refraktion aufzubauen. Im vorliegenden Fall sind die Abstände bei vollständiger Ausfahrun der Konsolen auf 50cm ausgelegt. Im eingefahrenen Zustand ragen sie etwa 35cm von der Innenwand ab.

Die so konstruierten Messkonsolen, die mit handelsüblichen Dreifüßen zur Aufnahme von Prismen und Tachymetern besetzt sind, bilden die Grundlage für die Umsetzung des Vermessungskonzeptes.

Der Einbau der Spannringe mit den Konsolen erfolgt durch die Baufirma anhand der vorab bestimmten Stationen bzw. der dafür in Frage kommenden Rohre. Die Höhe der Konsolen darf nur so hoch am Spannring befestigt werden, damit das Tachymeter im aufgebauten Zustand bedienbar bleibt (Abbildung 5.4). Die Menüführung des Tachymeters ist dann sitzend möglich. Alle Rohre sind nummeriert und im Rohrverlegeplan ersichtlich (SCHAD ET AL. 2008). Die Positionierung der Spannringe ist so festzulegen, dass jeweils eine Sichtverbindung zu dem rückwärtigen Messprisma und dem in Vortriebsrichtung nächsten Messprisma garantiert ist. Die Berechnung der Spannringpositionen erfolgt vor Beginn der Vortriebsarbeiten. Eine Beschreibung und Erläuterung wird im Kapitel 6 gegeben, weil die Vorberechnung von Messeinrichtungspositionen auch im Verfahren mittels autonomen Roboter eine wesentliche Aufgabe ist.

Der Ablauf einer Messung wird in den folgenden Abbildungen dargestellt und erläutert.

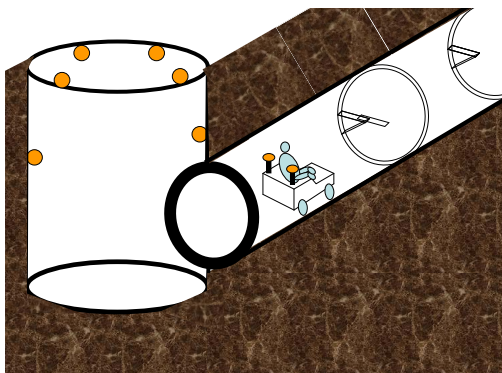


Abb. 5.5.1

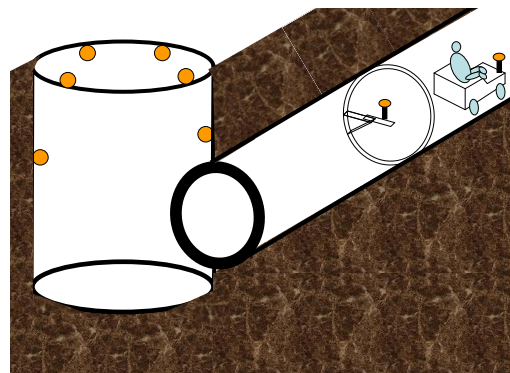


Abb. 5.5.2



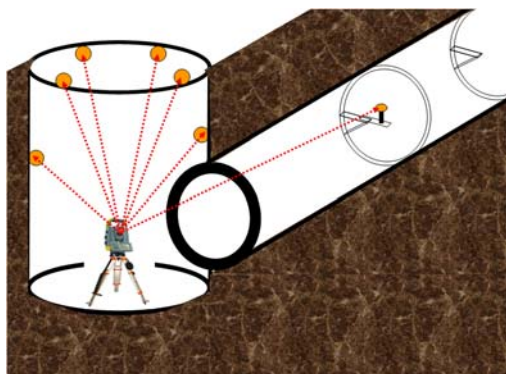


Abb. 5.5.3

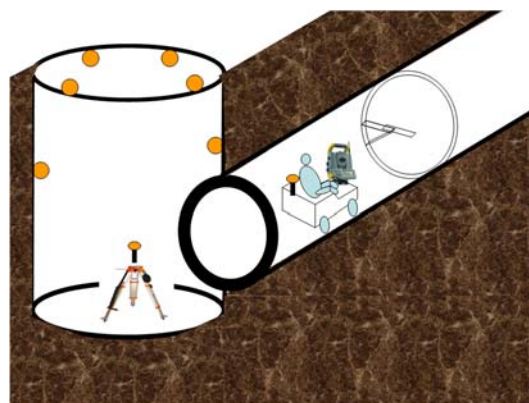


Abb. 5.5.4

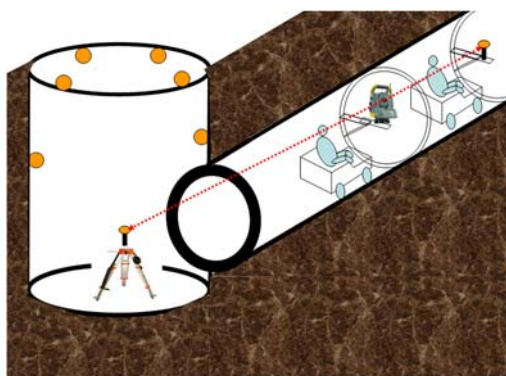


Abb. 5.5.5

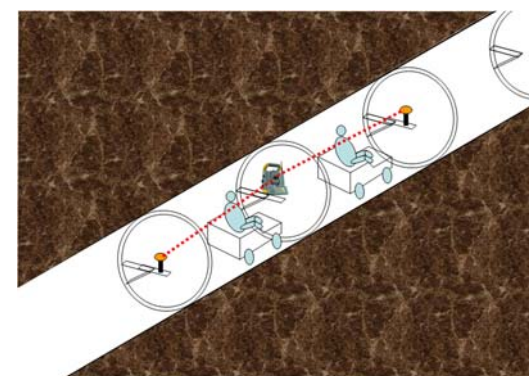


Abb. 5.5.6

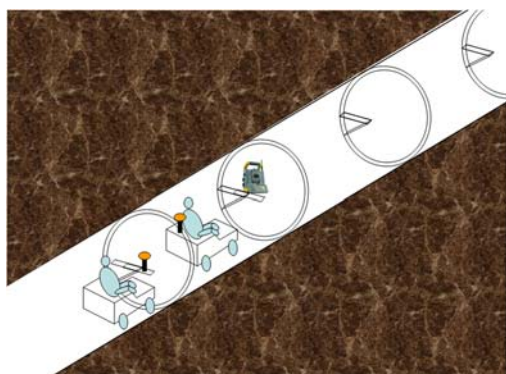


Abb. 5.5.7

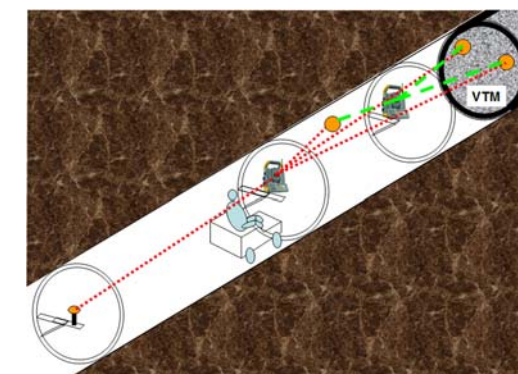


Abb. 5.5.8

Die Abbildung 5.5.1 zeigt einen Pressschacht mit den Kopfbalken- und Stützpunktprismen für die Herablegung. Ein Messwagen, bestückt mit Messprismen fährt in den Rohrstrang, der mit den Spannringen und den verschiebbaren Konsolen vorbereitet ist. Das erste Prisma wird, wie in der Abbildung 5.5.2 zu sehen, auf die ausgefahrne Konsole bzw. auf den darauf befestigten Dreifuß gestellt. Gleichzeitig werden die Kopfbalken- und Stützpunktprismen mittels eines Tachymeters angemessen mit Einbeziehung des ersten Konsolenprismas, Abbildung 5.5.3.

Der erste Messwagen fährt schon zum nächsten Spannring und baut dort das nächste Prisma auf, während das zweite Messfahrzeug, nachdem das Stativ im Pressschacht mit einem Messprisma versehen wurde, Abbildung 5.5.4, mit dem Tachymeter zum ersten Spannring fährt, dort anhält und das Tachymeter gegen das Messprisma auf der ersten

Konsole tauscht. Weil schon auf der zweiten Konsole ein Messprisma aufgebaut ist, kann entsprechend der Abbildung 5.5.5 die gewöhnliche Polygonzugmessung durchgeführt werden. Im Anschluss daran erfolgt der nächste Austausch von Messprismen und Tachymeter und anschließender Weiterführung der Polygonzugmessung, Abbildung 5.5.6.

Die Abbildung 5.5.7 zeigt, dass der Austausch bzw. die Umbesetzung der Messinstrumente zeitlich am effektivsten ist, wenn beide Messwagen gleichzeitig zu den jeweiligen Konsolen fahren. Nachdem das jeweilige rückwärtige Prisma angezielt worden ist, wird die Konsole wieder eingeschoben. Das ist aus Sicherheitsgründen wichtig, damit bei der Rückfahrt der Messwagenfahrer sich nicht daran verletzen kann.

Diese Vorgänge wiederholen sich so lange, bis die Vortriebsmaschine erreicht ist und deren Messeinrichtungen (Navigationssystem) in die Kontrollvermessung wie in Abbildung 5.5.8 zu sehen, einbezogen worden sind.

Dieser Vorgang ist der gleiche, wie bei der Vortriebskontrollvermessung in herkömmlicher Weise mit Stativen (Kapitel 4.1).

Eine Überprüfung bzw. Kontrolle der Vortriebsvermessung besteht wie bei der konventionellen Polygonzugmessung in der dreidimensionalen Bestimmung von Vergleichsstationen. Das sind festliegende Zuordnungen im Rohrstrang wie z. B. von Stationen in 100m – Intervallen (Tabelle 5.1). Diese Punkte ermöglichen einen Vergleich bei Folgemessungen an gleichen Stationen. Die Differenzen zwischen den Folgemessungen dürfen nur wenige Zentimeter betragen, bedingt durch mögliche Einschleiffeffekte der Rohre beim Vortrieb sowohl in der Lage als auch in der Höhe. Der Rohrstrang ist, wie schon angemerkt, solange ein sich stets bewogender Baukörper, bis er durch Ringspaltverpressung festgesetzt ist. Das ist dann der Fall, wenn die Vortriebsmaschine ihre Arbeit beendet hat und aus der Zielschachtgrube geborgen wurde.

Für die Messung von Vergleichsstationen ist am ersten Messwagen ein Messprisma im hinteren Teil des Wagens mittig montiert. Während der Kontrollvermessung wird das Prisma jeweils vom Konsolenstandpunkt, auf dem sich das Tachymeter befindet, eingemessen. Die entsprechende Stelle im Rohr, d. h. die immer wiederkehrende Station wie z. B. eine 100m-Station wird vorab für die Einmessung ermittelt. An dieser hält der Messwagen. Durch eine auf dem Messwagen montierte Röhrenlibelle ist es möglich, den Wagen in die Horizontale zu steuern. Bei eingespielter Libelle befindet sich das Messprisma genau in der Tunnelachse. Dadurch kann die Istlage des Rohres eingemessen werden. Die Höhe der Tunnelsohle an der Vergleichsstation berechnet sich aus der tachymetrischen Höhenbestimmung und des konstanten Abstands zwischen dem am Wagen montierten Messprisma und der Rohrsohle. Der Abstand kann einfach mittels Zollstock bestimmt werden. Er ist vom jeweiligen Rohrdurchmesser abhängig.

Die Rohre sind wie oben erwähnt, durchnummeriert. Die Vergleichsstationen bleiben in ihren Koordinaten immer an der gleichen Stelle. Eine Berechnung der Vergleichsstationen erfolgt unmittelbar vor Beginn der Vortriebsmessung. Dann ist bekannt, welches Rohr seit der letzten Kontrollvermessung eingeschoben wurde.

In nachstehender Tabelle 5.1 wurde z. B. am 08.11.2010 das Rohr 68 eingeschoben bzw. auf die Schildwaage gelegt. Mit den bekannten Rohrlängen, in diesem Beispiel von 3 Metern und Fugenbreiten von 3cm errechnet sich die Rohrnummer, wo der Messwagen für die Messung an der jeweiligen 100-Meter-Station halten muss, um eingemessen zu werden. Im Beispiel ist das der Haltepunkt von Rohrnummer 35 für die 100m-Station, das Rohr 2 für die 200m-Station.

Messdatum	Rohrlänge Fuge	Rohr- nummer						
			Station 100	Station 200	Station 300	Station 400	Station 500	Station 600
	<b>3,03</b>							
02.11.2010		22	0	0	0	0	0	0
03.11.2010		34	1	0	0	0	0	0
04.11.2010		40	7	0	0	0	0	0
05.11.2010		41	8	0	0	0	0	0
06.11.2010		55	22	0	0	0	0	0
07.11.2010		66	33	0	0	0	0	0
08.11.2010		68	35	2	0	0	0	0
09.11.2010		100	67	34	1	0	0	0
10.11.2010		101	68	35	2	0	0	0
11.11.2010		123	90	57	24	0	0	0
12.11.2010		134	101	68	35	2	0	0

Tabelle 5.1: Zuordnung von Rohrnummern zu 100m- Stationsintervallen

Eine genaue Koordinatenabsteckung für die Vergleichsstation ist nicht nötig. Es ist ausreichend, die Mitte des errechneten Rohres mit entsprechender Rohrnummer für die Einmessung zu wählen. Die einzelnen Rohre sind nicht dem Radius angepasst. In Tunnelbereichen, die in Bögen geplant sind, beträgt die Differenz zwischen dem Bogenscheitelpunkt und der Sehne bei Rohrlängen von 3m und einem Radius von z. B. 500m nur 2mm, bei einem Radius von 2500m nur noch 0,5mm und kann unberücksichtigt bleiben.

Die Messfahrt setzt, wie bereits beschrieben, einen Rohrstrang voraus, der frei durchfahren werden kann.

In langen Vortrieben werden Zwischenpressstationen (Dehnerstationen) in den Rohrstrang eingebaut (Abbildungen 5.6 und 5.7). Sie haben die Aufgabe, die Pressenkräfte der Hauptpressstation, die sich gewöhnlich in der Pressgrube befindet, zu reduzieren.

Durch die Zwischendehnerstation oder bei mehreren Dehnern wird ein Rohrstrang in einzelne Vortriebsabschnitte unterteilt, die taktweise mit reduzierter Mantelreibung vorge-schoben werden. Nach Beendigung des Vortriebes werden die Dehnerstationen wieder ausgebaut.

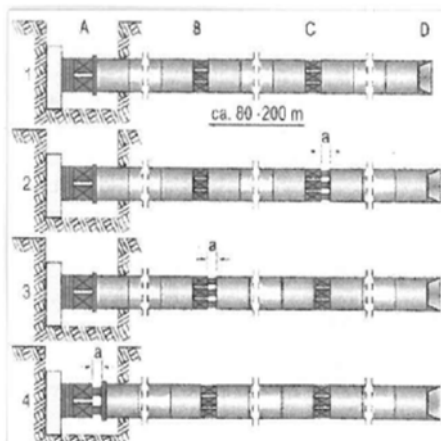


Abb. 5.6: Arbeitsprinzip von Zwischen-dehnerstationen (STEIN 2003)



Abb. 5.7: Zwischendehnerstation mit Überfahrmöglichkeit, Baustelle Emschergenossenschaft

In der Abbildung 5.6 sind die einzelnen Arbeitsschritte von Zwischendehnerstationen zu sehen. Auf die Anfangsstellung 1 mit eingefahrenen Dehnern folgt in Stellung 2 zuerst im Abschnitt C eine Dehnerausfahrt um den Wert a. Die Vortriebmaschine rückt um das Maß a vor. Der Vortrieb bei B in der Stellung 3 erfolgt um das Maß a, anschließend wird die Dehnerstation bei C zusammengefahren. Im Schacht A, Position 4, erfolgt der Vortrieb ebenfalls um a. Die Dehnerstation wird bei B zusammengefahren (STEIN 2003).

In der Abbildung 5.7 ist eine Dehnerstation in einem DN1800 zu sehen. Für die Überfahrt und für ein arbeitssicherheitsgerechtes Überqueren liegen zwei Holzbohlen über dem Dehnerbereich. Für die Fahrt eines Messwagens sind die Holzbohlen am Anfang und Ende abgeschrägt.

Im Kapitel 2.1.2, Rohrvortriebstechnik, ist der Unterschied zwischen einem hydraulischen Vortrieb und einem Vortrieb mit Lorenförderung erläutert worden. Im vorliegenden Verfahren mit dem Messwagen und den an den Spannringen montierten Konsolen sind Risiken zu beachten, die durchaus relevant werden können, wenn ein Vortrieb mittels Lore durchgeführt wird.

Die Konsolen haben im zusammengeschobenen Zustand eine Breite von ca. 35cm, wie oben erwähnt. Diese können sich bei einer Lorenförderung als problematisch erweisen, wenn die Lore in ihrer Bauart und Größe nicht konstant gleich sind. Wird die Lore nur um wenige Zentimeter breiter gebaut, würde das zur Folge haben, dass der Abstand zwischen der Loreaußenkante und der Konsole zu klein werden könnte. Noch problematischer könnte es werden, wenn die Konsole aus Versehen im ausgefahrenen Zustand nach einer Messfahrt verbliebe.

Die nachfolgende Abbildung 5.8 zeigt einen Vortrieb in schematischer Darstellung im Emscherprojekt. Der Abstand beträgt 10cm zwischen Konsole und Lore. Bei der Lorenförderung fährt die Lore nicht ausschließlich in der Rohrsohlenmitte. Sie „tendelt“ mal mehr, mal weniger seitlich weg, je nach Trassierung, d. h. in Kurven ist der seitliche Ausbruch von der Ideallinie größer als auf einer geraden Tunnelachse. Eine Alternative zur verschiebbaren Konsole ist eine verschwenkbare Konsole, die soweit in Richtung Rohrrinnenwand montiert und eingefahren wird, dass vorgenannte Behinderungen für eine Lore ausgeschlossen werden können.

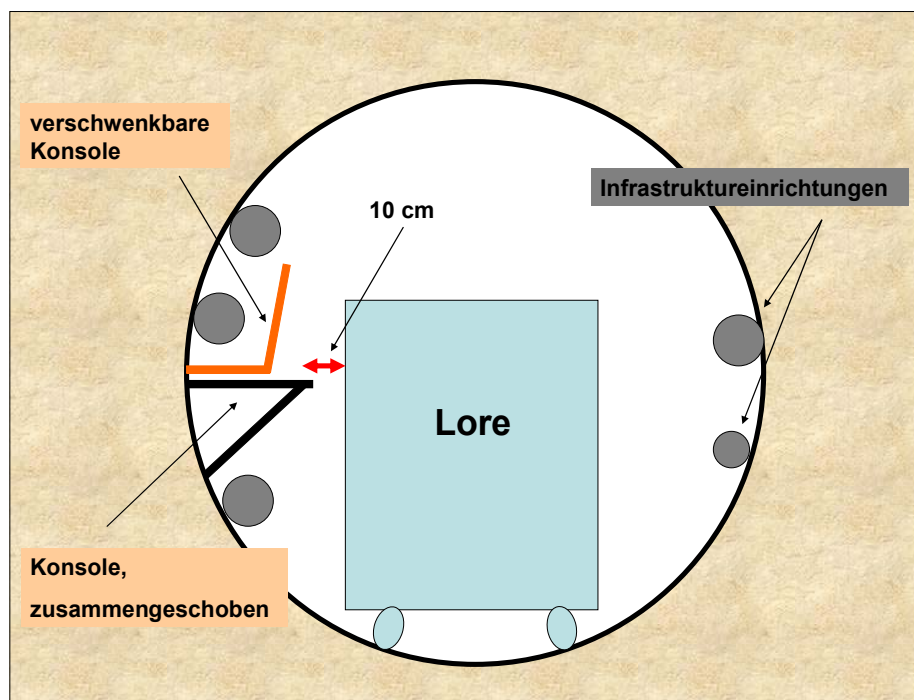


Abb. 5.8: Konsolenvarianten in Bezug zu Loren



### 5.2 Weiterentwicklung zum voll portablen Messsystem

Ein neues Verfahren gewinnt Akzeptanz bei einer Umsetzung besonders dadurch, wenn ein Nutzer die wesentlichen Neuerungen positiv wahrnimmt. Einschränkungen oder Risiken zu Anfang eines Projekts bedeuten entweder eine Anpassung und Abänderung oder führen zu einer Weiterentwicklung des neuen Verfahrens. Im ersten Verfahren können die Konsolenbreiten problematisch werden, wie zuvor erwähnt. Durch den Wegfall der Konsolen wird das Messverfahren unabhängiger.

Ein Wegfall der Konsolen führt wieder zu einem Einsatz von Stativen wie bei den herkömmlichen Messungen. Da eine Umfahrung in Rohren mit geringen Durchmessern nach wie vor nicht möglich ist, liegt die Lösung dieser Problematik in der Mitnahme von Stativen auf einem Messwagen.

In den Abbildungen 5.9 und 5.10 ist je ein elektrobetriebenes Messfahrzeug mit einem Vierbeinstativ zu sehen, welches auf einer Halterung mit Hubstange befestigt ist. Jedes Vierbeinstativ ist mit einer Messeinrichtung bestückt. Das Messverfahren, durchgeführt mittels üblicher Polygonzugmessung, erfordert den Einsatz von drei Messfahrzeugen. Zwei der drei Messfahrzeuge werden mit üblichen Messprismen und das dritte mit einem Tachymeter besetzt. Um eine Zentrierung über einen Messpunkt vornehmen zu können, ist in der Bodenplatte eines jeden Messfahrzeuges eine Öffnung eingelassen.



Abb. 5.9 Messfahrzeug mit Vierbeinstativ und Tachymeter, Eigenentwicklung Emschergenossenschaft

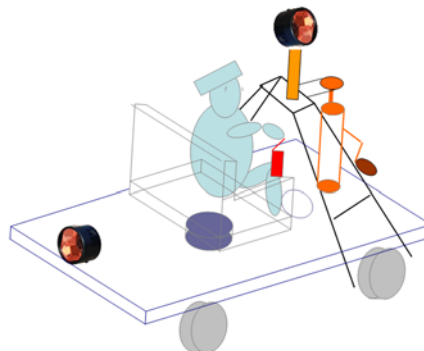


Abb. 5.10 Messfahrzeug mit Vierbeinstativ und Messprismen

Ein Vierbeinstativ ermöglicht im Gegensatz zu einem handelsüblichen Dreibeinstativ eine sofortige feste Stellung auf der Rohrsohle. Auf den baugleichen Vierbeinstativen befindet sich jeweils eine Röhrenlibelle für die Horizontierung. Diese ist durch seitliches leichtes Verschieben des Stativs auf der Rohrsohle einzuspielen. Dadurch haben alle Stative an dem jeweiligen Messpunkt die gleiche Höhe. Mit den Dreifußschrauben werden nur noch die Feinhorizontierungen durchgeführt. Auf die Höhe hat das keinen Einfluss. Mit Hilfe des optischen Lotes wird das Tachymeter bzw. das Messprisma über einen Messpunkt zentriert.

Der Messpunkt besteht aus einem handelsüblichen Frosch, der bei Nivellementsarbeiten als freier Wechselpunkt Anwendung findet. Aber auch jede andere Ausführung, wie z. B. einer Geldmünze, einer runden Plastikscheibe mit Zentrierung mittels Folie usw. kann genutzt werden. Entscheidend ist nur, dass der Messpunkt für die Zeit der Besetzung mit der jeweiligen Messeinrichtung für alle drei Messfahrzeugen unbewegt auf der Rohrsohle liegen bleibt und besetzt werden kann.

Die Vergleichsstationen werden in gleicher Weise wie bei der Konsolenlösung festgelegt und eingemessen. Auch hier braucht nur der erste Wagen mit dem Prisma bestückt werden, weil dieser als erstes Fahrzeug die Vergleichsstation erreicht und vom Tachymeter, welches sich stets auf dem zweiten Fahrzeug befindet, eingemessen werden kann.

Der Messvorgang gestaltet sich wie folgt:

Die Abbildung 5.11.1 zeigt wieder einen Pressschacht mit den für die Herablegung notwendigen Kopfbalken- und Stützpunktprismen wie schon in der Abbildung 5.5.1. Im Vortriebsrohr sind die Messfrösche an Haken der Spannringe, die die Infrastruktureinrichtungen für den Betrieb der Vortriebsmaschine aufnehmen, „geparkt“. Die Haltepunkte der Messfahrzeuge können wie im vorigen Verfahren vorbestimmt werden, d. h. sie sind stationsmäßig dort, wo ein Spannring aus dem zuvor beschriebenen Verfahren hätte eingebaut werden müssen. Im jetzt zu beschreibenden Verfahren besteht der Vorteil darin, dass es nicht mehr entscheidend für den Messvorgang ist, dass ein Spannring nicht zentimeterscharf an der vorberechneten Stelle eingebaut werden muss, da die Wahl der Messpunktplatzzierung der jeweiligen Vor-Ort-Situation angepasst werden kann. Bedingung ist nur, dass eine Sichtverbindung zu den einzelnen Messfahrzeugen besteht. Dabei können die Abstände zwischen den Messfahrzeugen jedes Mal variieren. Die Positionierung des Messpunktes erlaubt einen mittig im Rohr verlaufenden Messstrahl. Begünstigt wird die Mittigkeit zumindest in Rohren mit geringen Durchmessern von DN1600 durch die Bauhöhe des Messwagens mit der Hubeinrichtung und dem darauf befindlichen Tachymeter in einer Höhe von zusammen ca. 80cm (Kippachshöhe) über der Rohrsohle.

In der Abbildung 5.11.2 fährt ein Messfahrzeug, besetzt mit einem Messprisma, in den Rohrstrang bis zu der Stelle, wo sich ein Messfrosch seitlich am Haken der Spannringe befindet. Den Messfrosch legt der Fahrer auf die Rohrsohle, setzt hier mittels Hubvorrichtung das Stativ auf die Rohrsohle (ein Vorgang, der sich an jedem Haltepunkt für jedes Messfahrzeug wiederholt) und zentriert sein Messprisma darüber. In der Zwischenzeit erfolgt die übliche Herablegung mit anschließender Einmessung des Prismas auf dem ersten Messfahrzeug (Abbildung 5.11.3). Das zweite Messfahrzeug, mit dem Tachymeter ausgerüstet, fährt entsprechend Abbildung 5.11.4 zum ersten Messfrosch und wird darüber zentriert. Gleichzeitig fährt das erste Messfahrzeug zum zweiten Messfrosch, über den das Messprisma zentriert wird. In der Abbildung 5.11.5 zielt das Tachymeter auf das Schachtstativ, welches zwischenzeitlich mit einem Messprisma bestückt worden ist. Die Polygonzugmessung wird auf diesem Standpunkt abgeschlossen, indem das Messprisma auf dem ersten Messfahrzeug gemäß Darstellung in der Abbildung 5.11.6 eingemessen wird. Das dritte Messfahrzeug kommt, wie in Abbildung 5.11.7 zu sehen, zum Einsatz. Das führt zur normalen Polygonzuganordnung bzw. Polygonzugmessung, die solange fortgeführt wird, bis die Vortriebsmaschine erreicht ist. Hier befinden sich die Messprismen des Navigationssystems, welche wie bei der herkömmlichen Vortriebsvermessung und im



Verfahren mit den Spannringen und Konsolen in den Messvorgang einbezogen werden (Abbildung 5.11.8).

Die Messfrösche können so lange auf der Rohrsohle verbleiben, bis die Kontrollvermessung durchgeführt worden ist. Das hat den Vorteil, dass eine erneute Besetzung der Messpunkte möglich ist, wenn sich z. B. ein Messpunkt in seiner Lage verändert hat, sei es z. B. durch Unachtsamkeit bei der Anfahrt. Nach der Einmessung der Prismen an der Vortriebsmaschine beginnt die Rückfahrt zur Pressgrube. Dabei werden die Frösche wieder seitlich an die Haken gehängt und stehen so für die nächste Vortriebskontrollvermessung bereit.

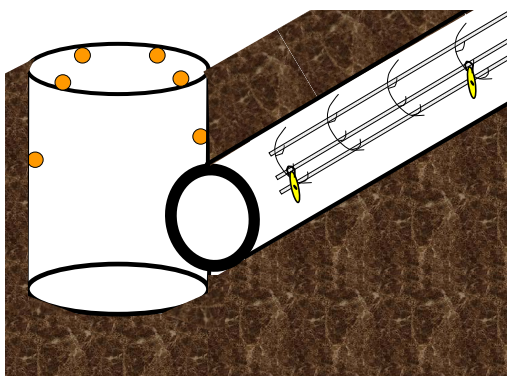


Abb. 5.11.1

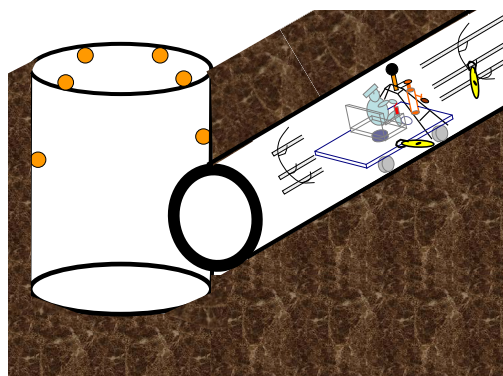


Abb. 5.11.2

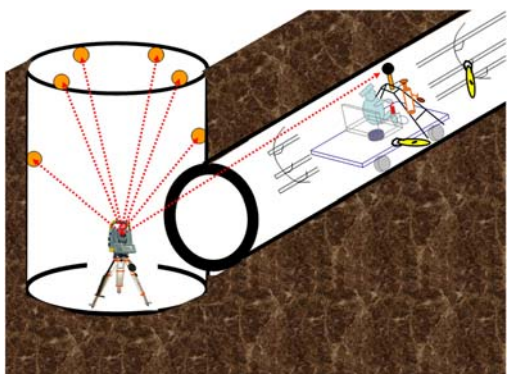


Abb. 5.11.3

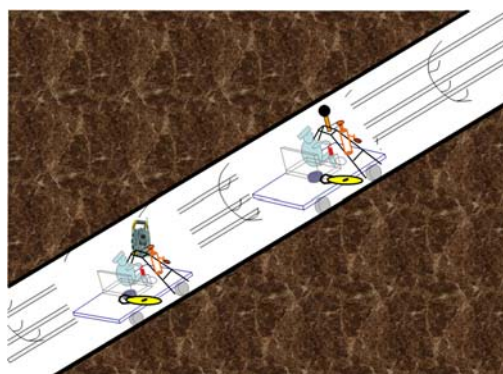


Abb. 5.11.4

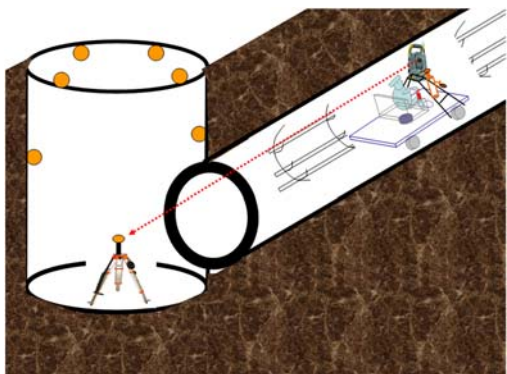


Abb. 5.11.5

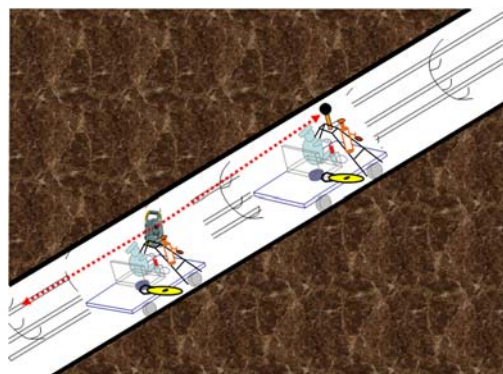


Abb. 5.11.6

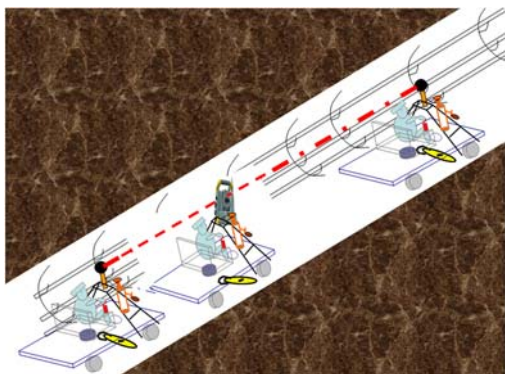


Abb. 5.11.7

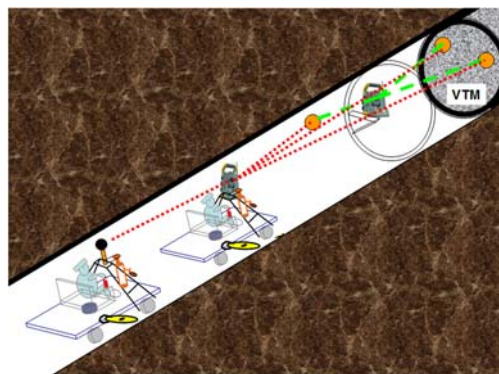


Abb. 5.11.8

### 5.3 Zusammenfassung der Messverfahren für Rohrvortriebskontrollen

Für die Rohrvortriebskontrollvermessungen stehen drei Verfahren zur Verfügung:

1. Herkömmliche Rohrvortriebskontrollvermessungen,
2. Kontrollvermessungen mit Messfahrzeugen mit Elektroantrieb und
3. Kontrollvermessungen mit voll portablem Messsystem.

Für alle Verfahren ist, um eine Vortriebskontrollvermessung durchzuführen, ein Grundlagentnetz, ein Portalnetz und ein Vortriebsnetz anzulegen. Die verschiedenen Möglichkeiten für die Anlage von Vortriebsnetzen sind im Kapitel 3.8 beschrieben. Die Herablegungen sind für jedes Messverfahren in gleicher Weise durchzuführen. Das erfolgt entweder durch Ablotungen oder durch Steilvisuren, wenn es sich um Schächte mit großen Tiefen handelt (Kapitel 3.7). Die Netzmessungen erfolgen durch Polygonzüge oder mittels Polygonnetzen.

Die Vortriebsnetze sind so konzipiert, dass die Messinstrumente, entweder das Tachymeter oder die Messprismen, auf Stativ- oder Konsolentellern aufgebaut werden müssen. Von diesen erfolgen die Vermessungen zu den jeweiligen Zielpunkten in den rückwärtigen wie in den vorwärtigen Rohrvortriebsbereich. Die Umsetzung der Messinstrumente für eine Folge-messung erfolgt in üblicher Weise manuell durch Messpersonal. Hierzu zählt das Ausrichten durch Verdrehen der anzuzielenden Messprismen auf den jeweiligen Tachymeterstandpunkt, ein üblicher Vorgang bei Polygonzugmessungen.

Durch den Einsatz der Messfahrzeuge werden die Anforderungen an den Gesundheitsschutz erfüllt. Gleichzeitig werden die Messzeiten der Kontrollvermessung reduziert, indem die Wegstrecken im Vortriebsrohr zu und zwischen den jeweiligen Messstandpunkten gefahren werden. Ein Messfahrzeug ist schneller als das sich zu Fuß bewegende Messpersonal, welches zudem noch das Messequipment mittragen muss.

### 6. Autonome Rohrvortriebskontrollvermessung mit Messroboter

Das Ziel, den Automatisierungsgrad bei Vortriebsmaßnahmen deutlich zu steigern, kann mit den unter Punkt 2 und 3 des vorstehenden Kapitels 5.3 beschriebenen Messverfahren nur teilweise erreicht werden. Für die Durchführung beider Neuverfahren ist immer noch Messpersonal nötig. Eine Kontrollvermessung ohne Messpersonal durch einen Messroboter wäre ein entscheidender Schritt zur Zeit- und Kostenreduzierung und würde damit beitragen, eine im Endstadium vollständig automatisierte Vortriebskontrollvermessung zu realisieren.

Die Kontrollvermessungen sollen demzufolge autonom, d. h. ohne menschliche Unterstützung, also ohne ein Eingreifen in den Messprozess erfolgen. Folglich können die Messinstrumente, d. h. das Tachymeter und die Messprismen nicht auf herkömmliche Instrumentenplattformen gesetzt werden.

Ein Messroboter ist dafür so auszurüsten, dass er losgelöst von jedweder externen Bedienung ein vorbestimmtes Messverfahren autonom ausführt. Zwischen Automation und Autonomie bestehen Unterschiede.

*Automation* beschreibt einen selbsttätigen, schematisch oder maschinell ablaufenden Prozess. Die Gründe, auf automatisierte Systeme zurückzugreifen, liegen darin, menschliche, teure Arbeit durch maschinelle zu ersetzen. Zudem können immer wiederkehrende Arbeitsprozesse vereinigt werden, was zur Folge hat, sich von monotonen Arbeiten zu entlasten. Auch unter dem Aspekt des Arbeits- und Gesundheitsschutzes leistet die Automation einen wesentlichen Beitrag in technischen Arbeitsabläufen.

*Autonomie* ist mit Freiheit, Selbständigkeit und Ungebundenheit beschrieben und die Grundlage von Robotiksystemen, welche sich in zwei Kategorien zusammenfassen lassen.

Die erste Gruppe sind die stationären Roboter, die an einem festen Punkt gebunden sind. Beispiele hierfür finden sich in der Industrie, besonders im Automobilbau und in der Medizin. Nach Definition der VDI-RICHTLINIE 2860 sind Industrieroboter universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkel frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und ggf. sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.

Die zweite Gruppe sind die mobilen Roboter, die so genannt werden, da sie sich in verschiedenen Umgebungen wie zu Land, im Wasser und in der Luft frei und ohne externe Unterstützung bewegen. Sie helfen bei der Verrichtung von menschlicher und maschineller Arbeit und können andere Einheiten bedienen (OUBBATI 2012/13).

Für ein mannloses Vermessungsverfahren bildet ein mobiler Roboter (Abbildung 6.1) die Basis für ein autonomes System. Der Roboter erfüllt dabei die Funktion als Trägerplattform für das Messequipment. Er ist autonom, weil die Steuerungssoftware und die eigenständige Energieversorgung im Roboter implementiert sind.

Für die Realisierung einer autonomen Kontrollvermessung ist neben dem mit Messequipment besetzten Roboter ein abgestimmter Messablauf erforderlich, der im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird. Daran anschließend erfolgen eine Beschreibung des Roboters, des für die autonome Kontrollvermessung notwendige Vortriebsnetz und die dazu gehörenden Messprismen.





Abb. 6.1: Der Messroboter (Prototyp), Eigenentwicklung der Emschergenossenschaft

### 6.1 Der Messablauf für die autonome Rohrvortriebskontrollvermessung

Anhand der Abbildungen 6.2.1 – 6.2.6 wird zuerst das autonome Messverfahren dargestellt und beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Komponenten wie Vortriebsnetz und Messprismen erläutert.

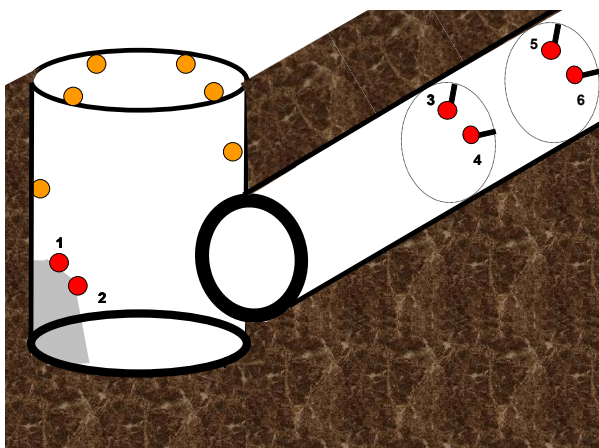


Abb. 6.2.1

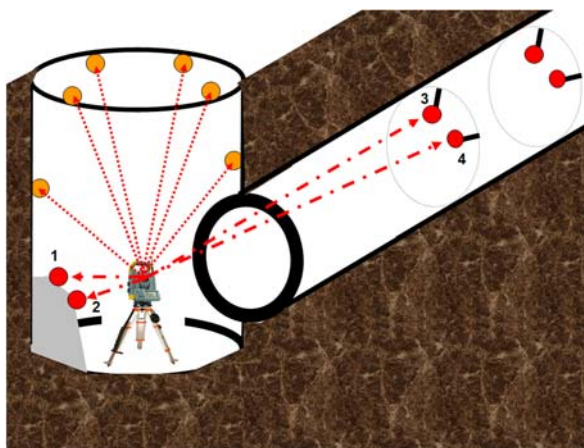


Abb. 6.2.2

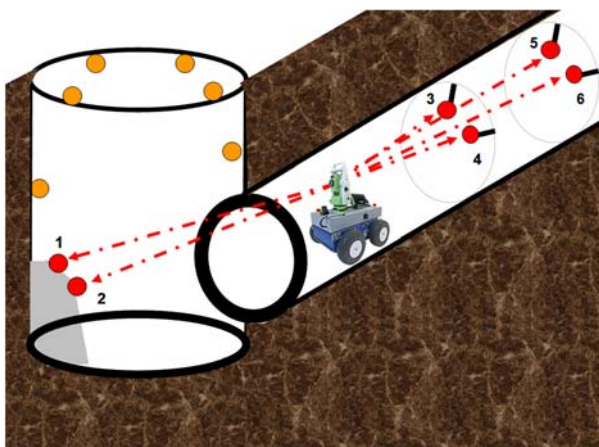


Abb. 6.2.3

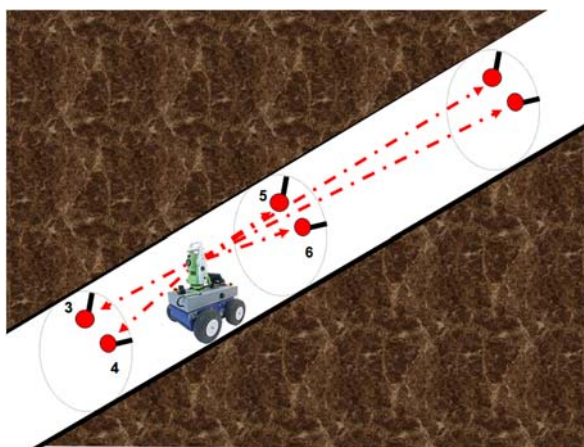


Abb. 6.2.4

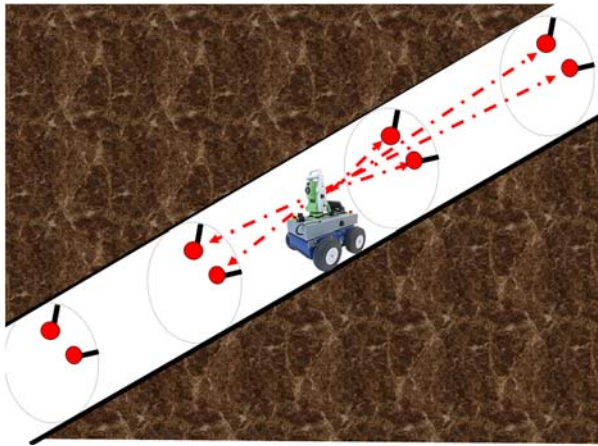


Abb. 6.2.5

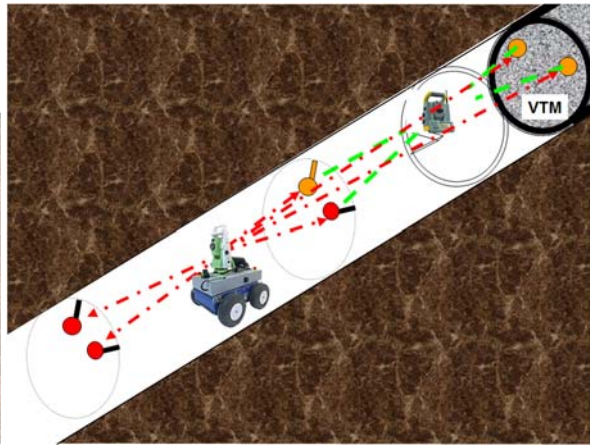


Abb. 6.2.6

Die Situation im Startschacht (Abb. 6.2.1) ist schon bei den mit Messpersonal besetzten Messwagen beschrieben worden. Auch im Verfahren mit dem Messroboter befinden sich Prismen am Kopfbalken und je nach Tiefe der Pressgrube in der Schachtwand. Zusätzlich werden zwei Messprismen am Pressenwiderlager montiert (Prismen 1 und 2). Für die Übertragung der Richtung und der Koordinaten zur Vortriebsmaschine bzw. zum Navigationssystem befinden sich Messprismen 3 - 6 in der Haltung an vorberechneten Tunnelstationen. Diese sechs Prismen bilden ein Messpunktfeld als Teil des Vortriebsnetzes (Kapitel 6.3). Pro Station werden links und rechts von der Tunnelachse Messprismen montiert.

Die Herablegung erfolgt wieder über alle Messprismen. Zusätzlich werden entsprechend Abbildung 6.2.2 die Messprismen 1 und 2 am Pressenwiderlager und die ersten beiden Messprismen 3 und 4 in der Haltung in das Messprogramm integriert. Die Messung erfolgt separat mittels eines auf Stativ stehenden Tachymeters oder kann auch mit dem Tachymeter ausgeführt werden, welches auf dem Messroboter montiert ist.

Der Messroboter fährt wie in Abbildung 6.2.3 dargestellt, in den Rohrstrang. Nach Erreichen der vorberechneten Halteposition misst das Tachymeter erneut die Messprismen 1 - 4 ein, beginnend mit den Prismen 3 und 4. Danach erfolgt die Einmessung der Prismen 5 und 6.

Damit sind von einer Roboterposition in einem Messvorgang 6 Messprismen eingemessen worden. Diese Anzahl von Prismeneinmessungen wird bei der weiteren Messfahrt nicht mehr verändert. In der Abbildung 6.2.4 ist der Messroboter vor ein nächstes Prismenpaar gefahren und beginnt nach dem Halten mit der Einmessung der 6 Prismen.

Auf dem Weg zur Vortriebsmaschine hält der Messroboter wieder am nächsten Prismenpaar wie in Abbildung 6.2.5 zu sehen, an und beginnt in gleicher Reihenfolge wie schon zuvor bei den anderen Haltepunkten mit der Richtungs- und Streckenmessung zu den 6 dafür vorgesehenen Messprismen.

Der Messvorgang bzw. die Messfahrt des Roboters wird so lange durchgeführt (Abbildung 6.2.6), bis das Navigationssystem, bestehend z. B. aus den drei Messprismen der Abbildung 4.13, eingemessen werden kann. Die drei Messprismen werden um ein viertes Prisma ergänzt, so dass wieder ein Messpunktfeld mit 6 Messprismen vorliegt.

Nach der Einmessung der letzten Prismen, welche hier Prismen des Navigationssystems sind, erfolgt die Rückfahrt des Messroboters zum Ausgangspunkt. Durch die Aufsummierung der Fahrstrecken zwischen den jeweiligen Haltepunkten bei der Hinfahrt liegt auch die Gesamtstrecke vom ersten Haltepunkt bis zur Vortriebsmaschine vor.

### 6.2 Der Messroboter

In den Beschreibungen zu den Vortriebskontrollmessverfahren mittels Messfahrzeugen wurden für den Bau eines Fahrzeuges berufsgenossenschaftliche Regelungen und Vorschriften hinsichtlich von Mindestlichtmaßen gemäß Arbeitsblatt DWA-A-125 (Abbildung 5.2) angeführt. Die Messfahrzeuge wurden dementsprechend mit einer Breite von 60cm konstruiert.

Folglich ist auch für den Messroboter die Maximalbreite von 60cm einzuhalten. Für die Länge des Roboterchassis sind keine Vorgaben zu beachten. Es muss nur so lang sein, dass es für das Messequipment genügend Platz bietet.

Das Messequipment besteht aus einem Tachymeter, einem Dreifuß zur Aufnahme des Tachymeters sowie verschiedene Sensoren. Die Sensorwerte werden für die Berechnungen von Schrägstellungen des Roboters bei der Suche der Messprismen benötigt.

Der Prototyp hat eine Länge von 60cm und eine Breite von 53cm. Darin einbezogen sind die Räder mit einem Durchmesser von 20cm. Diese sind luftgefüllte Gummireifen und sorgen für eine Abfederung bei möglichen Stößen beim Überfahren von Rohrfugen und Spannrinnen. Hartgummireifen wurden demzufolge nicht gewählt. Die Räder sind so profiliert, dass eine Fahrt bei gelegentlich auftretenden Verschmutzungen im Vortriebsbereich durchgeführt werden kann.

Die Trägerplattform liegt 30cm über der Standfläche. Mit einem Gewicht von ca. 30kg fährt der Roboter mit einer Geschwindigkeit von 6 km/h durch den Tunnel. Das Gewicht ist abhängig vom Gewicht der Einzelkomponenten und kann je nach Ausstattung und Wahl z. B. der Motoren und Batterien variieren.

Auf dem Chassis befinden sich vorne und hinten zwei manuell bedienbare Notschalter, mit denen eine Roboterfahrt im Falle einer Störung unverzüglich beendet werden kann.

Die Umsetzung der neuen Messverfahren mit manuell bedienbaren Messwagen erfolgte durch die Emschergenossenschaft in Eigenregie. Der Schritt zu einem mannlosen System war eine folgerichtige Konsequenz und typisch für Entwicklungsprozesse. Eine Wirtschaftlichkeitssteigerung wird in der Regel durch Automation erreicht.

Für den autonomen Messroboter hat die Emschergenossenschaft das gesamte Messkonzept erarbeitet und festgelegt, was ein Messroboter leisten muss, um die mannlose Kontrollvermessung realisieren zu können.

Der Bau eines Prototyps erfolgt durch einen externen Partner. Die Aufgabe besteht darin, einen Roboter zu entwickeln, der die im Messablauf festgelegten Arbeitsschritte selbstständig durchführt. Dazu gehört nicht nur die eigentliche Fahrt im Tunnel, sondern auch die zum richtigen Zeitpunkt durchzuführende Ansteuerung des Tachymeters mit dem Ergebnis, dass die für eine Kontrollvermessung notwendige Suche, Erfassung und Einmessung von Messprismen eine anschließende Auswertung ermöglicht.

### 6.3 Das Vortriebsnetz für das autonome Messverfahren

Die in den Abbildungen 3.49–3.52 aufgeführten Messnetze werden konventionell mit Messpersonal tachymetrisch bestimmt. Als eine Alternative wurde das in der Abbildung 3.53 dargestellte Netz aufgeführt, welches für eine autonome Vortriebskontrollvermessung von grundlegender Bedeutung ist. Es unterscheidet sich zu den anderen wie berichtet dadurch, dass die Netzknoten nicht vom Tachymeter besetzt werden.

Das Vortriebsnetz besteht aus Messprismen, die zu einem Messpunktfeld von je 6 Messprismen zusammengefasst werden. Die Prismen werden für dieses Messverfahren speziell als Doppelpismen angefertigt. Speziell deswegen, da im Gegensatz zu herkömmlichen Messprismen, welche zur Messvisur gedreht werden, eine Anzielung nur aus einer Richtung erlauben. Die Messpunkte für das autonome Verfahren werden jeweils aus zwei Richtungen angezielt. Die Doppelpismen sind in sich unbeweglich (Kapitel 6.4).



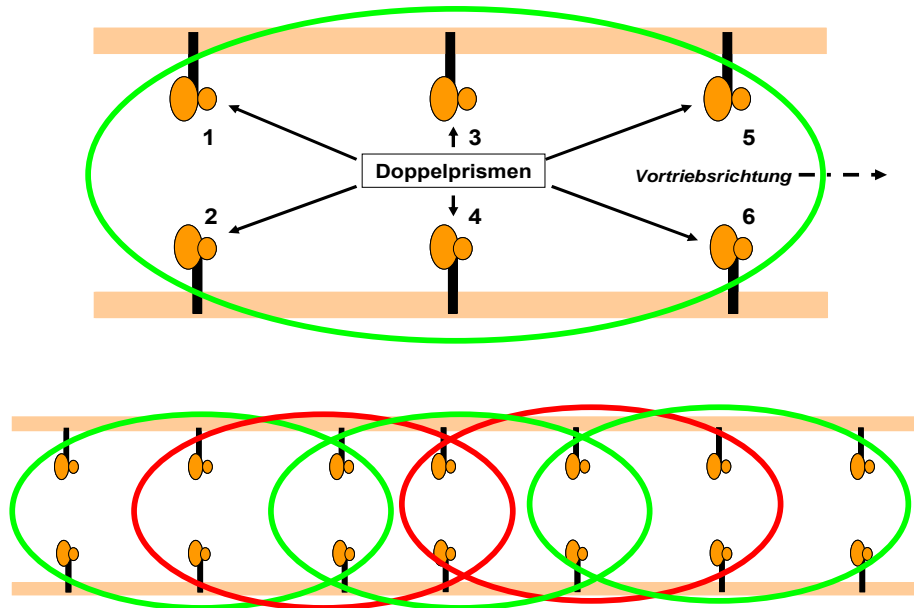


Abb. 6.3: Messpunktfeld als Teil des Vortriebsnetzes mit Darstellung überlappend aneinander gereihter Punktfelder

Die Koordinatenbestimmung der Vortriebsnetzpunkte bei herkömmlichen Polygonzügen oder Polygonnetzen erfolgt durch fortgesetztes polares Anhängen (Polarverfahren), ein Grundprinzip jeder Polygonzugmessung bzw. Polygonzugberechnung. Ein Neupunkt wird daher immer durch die bekannten Koordinaten der vorherig gemessenen und berechneten Mess- oder Polygonpunkte koordinatenmäßig bestimmt. Damit ist zugleich die Art und Weise vorbestimmt, wie ein Vortriebsnetz aufzubauen ist. Das neue Messkonzept unterliegt der gleichen Logik. Auch hier wird durch fortgesetztes Anhängen von Messpunkten die Koordinatenübertragung umgesetzt. Der Unterschied zu den bisherigen Vortriebsnetzen besteht darin, dass hier mehrere Messpunkte in Form von Messpunktfeldern überlappend (Abbildung 6.3) aneinander gereiht werden. Das letzte Messpunktfeld des Vortriebsnetzes endet an der Vortriebsmaschine bzw. findet seinen Abschluss nach Einbeziehung der Messeinrichtungen für die Maschinensteuerung (Kapitel 4.3) in gleicher Weise wie bei den manuellen Messverfahren.

Die Doppelprismen bilden das gesamte Vortriebsnetz. Im Rohrstrang werden an vorgegebenen Stationen jeweils zwei Doppelprismen befestigt. Beide bilden einen Prismenring. Während der gesamten Vortriebsdauer verbleiben die Prismen in ihrer Befestigung bzw. Halterung und verändern ihre Position nur entsprechend dem fortlaufenden Vortrieb, eine Anwendung nach dem Prinzip von mitfahrenden Messstationen. Es handelt sich dabei um verlorene oder temporäre Messpunkte, was keinen Unterschied zu herkömmlichen Messungen bedeutet. Auch hier sind die Koordinaten der Polygonpunkte nur für die Zeit der Vermessung gültig. Bedingung für jede Kontrollvermessung ist ein ruhender Vortrieb, damit eine Verbindung zum oberirdischen, d. h. zum Grundlagen- und Portalnetz hergestellt werden kann.

Die Doppelprismen sind in jedem Messpunktfeld von 1 bis 6 durchnummeriert. Nach Einmessung der Prismen von einem ersten Standpunkt  $n$  des ersten ( $n$ -ten) Messpunktfeldes wird aus der Nummer 3 des Doppelprismas die Prismennummer 1 des zweiten ( $n+1$ 'ten) Messpunktfeldes. Wie in nachfolgender Abbildung 6.4 ersichtlich, wird im Weiteren aus der Prismennummer 4 die Nummer 2 des Prismas im nächsten Messpunktfeld, die Nummer des Prismas 5 wird zur Nummer 3 und die Nummer des Prismas 6 ändert sich zur Prismen-

nummer 4 des zweiten Netzes. Diese Umnummerierung wiederholt sich bei jedem weiteren Messpunktfeld bis zur Vortriebsmaschine. Am Ende der Vortriebskontrollvermessung liegen von allen Prismen der sich überlappenden Messpunktfelder die dazugehörigen Messelemente wie Horizontal- und Vertikalwinkel und die Schrägstrecken vor.

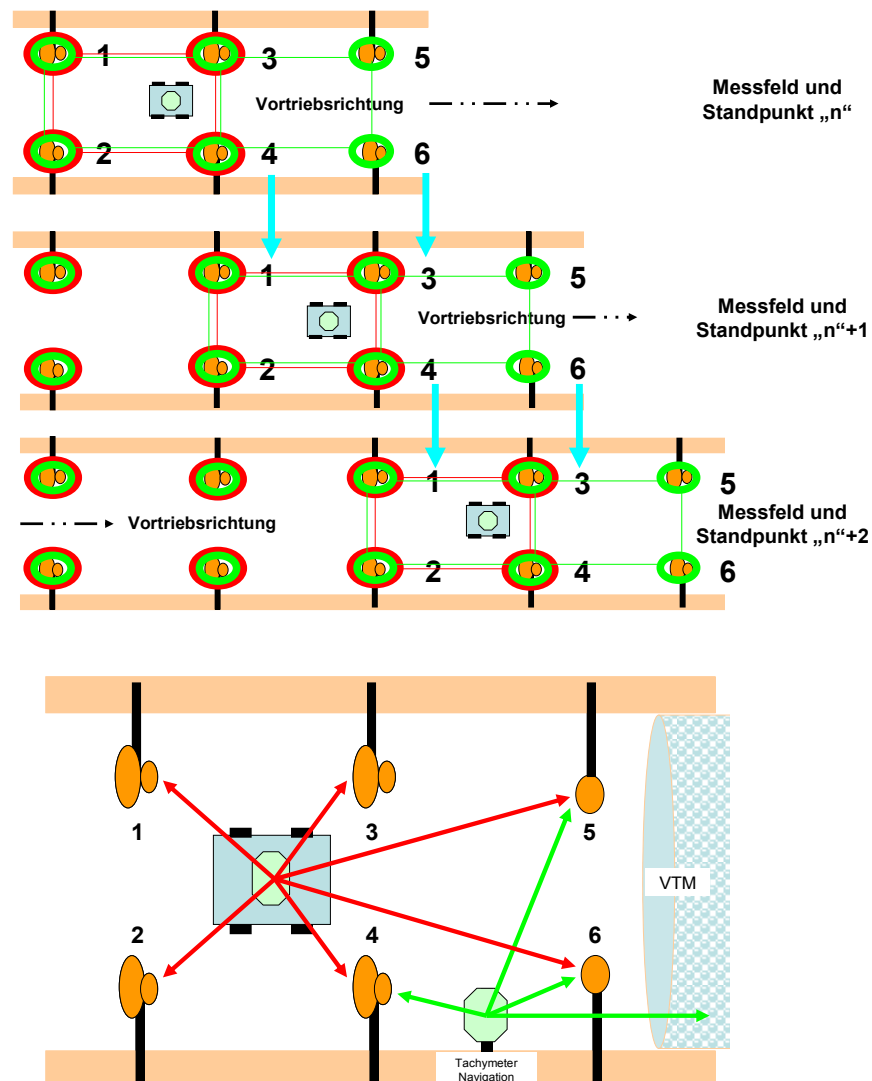


Abb. 6.4: Fortgesetztes Anhängen von Messpunktfeldern mit jeweiliger Umnummerierung und Anschluss an das Navigationssystem der Vortriebsmaschine

Die in der Abbildung 6.2.3 dargestellte Messsituation, in der der Messroboter eine erste Position im Vortriebsrohr eingenommen hat und aus dieser die Messprismen 1-6 durch Richtungs- und Streckenmessung erfasst, unterscheidet sich zu den Messsituationen in den Abbildungen 6.2.4 und 6.2.5 dadurch, dass die Prismen 1 und 2 als herkömmliche Prismen am Pressenwiderlager zwischen die Pressen symmetrisch zur Tunnelachse montiert werden. Sie werden immer nur von einer Richtung aus angemessen (Abbildung 6.5).

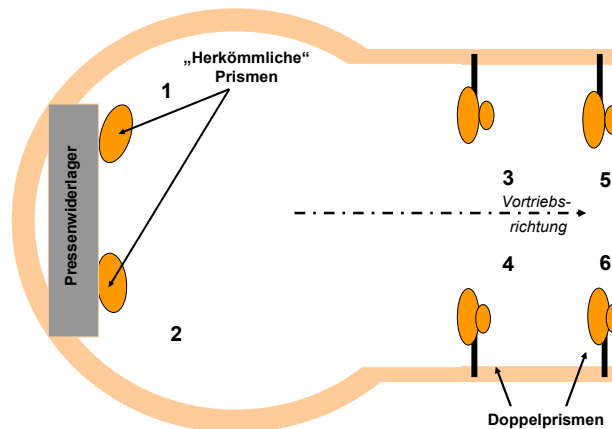


Abb. 6.5: Messpunktfeld im Pressschacht, Prismenpositionierung am Pressenwiderlager

### 6.4 Messprismen und Zubehör für den Einsatz des Messroboters

Messprismen in üblicher Form und Anwendung werden durch Messpersonal auf horizontierten Dreifüßen gesetzt und auf das Tachymeter ausgerichtet. Je nach Messfortschritt sind die Prismen zu drehen, um Richtungen und Strecken messen zu können. Die Horizontierung hat zur Folge, dass die Stehachse des Messinstruments, ob Tachymeter oder Prisma, senkrecht im Raum zu stehen kommt, eine Grundbedingung jeder Vermessung. In dem autonomen Messkonzept kommen diese Prismen nicht zum Einsatz. Die Messprismen im Roboter-konzept müssen so konzipiert sein, dass sie aus zwei Richtungen ohne Drehung im Vor- und Rückblick die Prismenmitte treffen. Die Lösung liegt in der Konstruktion von Doppelprismen. Das Doppelprisma setzt sich beispielsweise aus einem GPR1-Prisma von LEICA und einem Miniprisma GTP25 von GLUNZ TECHNIK GMBH (2013) zusammen (Abbildung 6.7). Das GPR1-Prisma ist baugleich mit einem GPH1 mit einem Durchmesser von 62,5mm (GOECKE 2014). Das Miniprisma wird mittels Plastikhalterung so auf die Rückseite des GPR1-Prismas montiert, dass der Abstand zur gemeinsamen Prismenachse möglichst gering ist. Bau-technisch bleibt ein Abstand von wenigen Millimetern übrig. Dieser Wert wird bei der Anzielung auf das Miniprisma als Konstante bei der Streckenmessung angebracht oder bei der späteren Auswertung berücksichtigt. Die Gesamtgröße des robust gebauten Doppelprismas wird durch den Einbau des Miniprismas ebenso reduziert wie das Gesamtgewicht. Das Doppelprisma wird mit einer Halterung auf eine Fußplatte montiert, die ihrerseits im Druckübertragungsring (Abbildung 6.6) mit einer Holzschraube befestigt wird.

Druckübertragungsringe haben die Aufgabe, den Druck zwischen den einzelnen Betonrohren aufzunehmen, zu mindern bzw. auszugleichen. Sie sind aus Holz oder Holzwerkstoffen. Kommen Sperrholz oder Spanplatten zum Einsatz, sind wasserfest verleimte Hölzer vorzusehen (STEIN 2003).



Abb. 6.6: Vortriebsrohr mit Druckübertragungsring vor Einbau, eingebautes Doppelprisma  
Baustelle Emschergerossenschaft

Die Fußplatte berührt das Betonrohr nur mit an den Ecken der Platte befindlichen Schraubspitzen. Damit das Doppelprisma stets rechtwinklig bzw. radial positioniert wird, sind zwei Abstandshalter unter der Fußplatte eingeschraubt, die beim Einbau der Halterung in den Druckübertragungsring dafür Sorge tragen, die Platte und damit auch das Doppelprisma parallel zur Betonkante des Vortriebsrohres einzubauen.



Abb. 6.7: Doppelprisma, Vorder- und Rückseite, Fußplatte, Eigenentwicklung  
Emschergerossenschaft

Die Prismen werden als Prismenring (Abbildung 6.8) innerhalb des Vortriebsrohres im Uhrzeigersinn auf 10.30 Uhr für das linke und auf 13.30 Uhr für das rechte Prisma in Vortriebsrichtung gesehen in den Druckübertragungsring geschraubt. Die Prismenhalterlängen sind variabel zu halten, um entsprechend auf örtliche Begebenheiten bzw. Infrastruktureinrichtungen reagieren zu können. Der Mindestabstand beträgt aus Refraktionsgründen ca. 25cm von der Rohrrinnenwand bis zum Prismenzentrum.

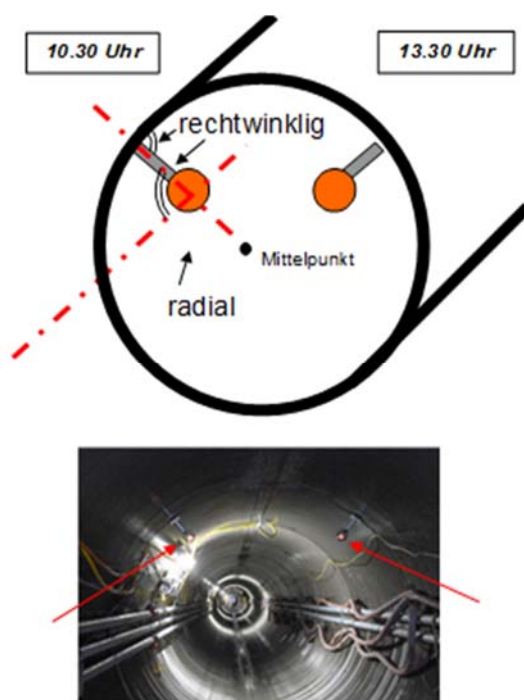


Abb. 6.8: Rechtwinkligkeit der Prismenachsen

Eine Alternative zu den Doppelprismen besteht für das Messprismenkonzept in der Nutzung von 360°-Prismen (Abbildung 6.9). Diese haben den Vorteil, dass sie aus allen Richtungen angezielt werden können. Die Entscheidung, Prismen in der beschriebenen Weise zu entwickeln bzw. zu bauen und nicht auf 360°-Prismen zurückzugreifen, begründet sich durch die Anzielgenauigkeiten der 360°-Prismen und im hohen Anschaffungspreis. Die von LEICA (2009) angebotenen Rundumprismen sind u. a. das GRZ4, GRZ122 und GRZ101.



Abb. 6.9: LEICA, 360° Reflektoren GRZ4, GRZ122 und GRZ101

*Internetrecherche	Modell	Anziel- genauigkeit mm	Preis* ca. €	bei 30 Prismen ca. €
360° - Prisma	GRZ4	2,0; 5,0	1.200*	36.000
360° - Prisma	GRZ122	2,0	1.900*	57.000
360° - Prisma	GRZ101	1,5	700*	21.000
Doppelprisma	GPR1/GTP25	1,0/1,0	350	10.500

Tabelle 6.1: Prismenübersicht



Die Anzielgenauigkeiten der Prismen sind in vorstehender Tabelle 6.1 aufgelistet. Das GRZ4 wird vom Hersteller mit einer 3D-Genauigkeit von 5mm angegeben, wobei eine Genauigkeitssteigerung von besser 2mm erreicht werden kann, wenn eine mit gelben Pfeilen markierte Seite direkt angezielt wird. Das GRZ122 liegt bei der 3D-Anzielgenauigkeit bei 2mm und das GRZ101 kommt auf eine Genauigkeit von 1,5mm, wobei im Datenblatt nicht von 3D-Anzielgenauigkeit gesprochen wird. Die Genauigkeit beim GPR1-Rundprisma liegt bei 1mm. Die Messgenauigkeit ist auch abhängig davon, wie das Prisma im Gehäuse montiert ist und wie der optische Mittelpunkt des Prismas mit der Stehachse des Prismenhalters zusammenfällt (LEICA 2009). Diese Zentriergenauigkeit spielt im Messroboterkonzept keine Rolle. Die Prismen werden, auch wenn 360°-Prismen zum Einsatz kämen, mit der in Abbildung 6.6 gezeigten Halterung fest im Bauwerk, d. h. im Druckübertragungsring montiert. Im autonomen Messverfahren ist nur die Anzielgenauigkeit des Prismenzentrums von Bedeutung.

Bei 360°-Prismen „wandert“ konstruktionsbedingt das Zentrum der Einzelprismen aus der Stehachse je nach Drehung des Prismenstabes (BOHNENSTINGL 2018). BEETZ (2012) untersucht die systematischen Effekte bei Reflektoren. Das Prisma befindet sich dabei lotrecht auf einem Robot-Tachymeter und wird während der Drehung des 360°-Prismas kontinuierlich eingemessen. BEETZ (2012) führt an, dass die systematischen Effekte bei Rotationen durch Untersuchungen von FAVRE und HENNES (2000) bekannt sind. Sie können mehrere mm Abweichung erreichen. FAVRE und HENNES (2000) bestätigen in ihren Untersuchungen die Genauigkeitsangaben der Hersteller von 3mm  $\pm$ 3ppm. BEETZ (2012) führt INGENSAND (2001) an, der bei allen 360°-Prismen systematische Effekte festgestellt hat, die aber nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionen haben.

Im autonomen Messverfahren sind die Messprismen fest im Tunnel eingebaut und während der Messungen aus zwei Richtungen immer unbewegt. Wie schon ausgeführt, wird eine Kontrollvermessung nur in einem ruhenden Vortrieb durchgeführt. Die Messprismen bewegen sich im autonomen Messverfahren nur durch den Vortrieb selber (mitfahrend). Sobald der Vortrieb nach der Kontrollvermessung wieder startet, verändern sich unmittelbar Lage und Höhe der Prismen.

Die Untersuchungen werden bei BEETZ (2012) mit lotrechten 360°-Prismen durchgeführt. Die Genauigkeitsangaben beim LEICA 360°-Prisma GRZ4 beziehen sich ebenfalls auf eine Anwendung mit Lotstock. Die Auswirkungen einer radialen Stellung eines 360°-Prismas im Messroboterverfahren auf die Anzielgenauigkeit ist nicht weiter verfolgt worden, da entscheidend für die Entwicklung von Doppelprismen die eindeutig hohen Anschaffungskosten der 360°-Prismen sind. Die Anzahl von 30 Doppelprismen in Tabelle 6.1 ergibt sich bei einer Vortriebslänge von 600m und einem Prismenringabstand von 40m.

## 6.5 Wahl des Dreifußes

Die Nutzung von Dreifußen dient in der Vermessung der Horizontierung und Zentrierung von Messinstrumenten. Darauf beruhen alle Anwendungen. Die Dreifüße besitzen Fußschrauben und eine Libelle, mit denen eine horizontale Ebene erzeugt wird. Diese bildet einen rechten Winkel zur Stehachse. Die Horizontierung und Zentrierung erfolgt manuell.

Durch die Automatisierung der Messinstrumente, besonders der Tachymeter, eröffnen sich weitreichende Anwendungsmöglichkeiten z. B. in Monitoringprojekten. Immer dort, wo sich das Tachymeter selber in einer sich bewegendenden Umgebung befindet und in vorgegebenen Intervallen Messprismen anzielen und einmessen muss, ist eine stetige Horizontierung notwendig, die in der Regel nicht mehr manuell durchgeführt werden kann. Die Lösung einer ständigen Horizontierung liegt in der Nutzung eines automatischen Dreifußes wie z. B. des automatischen Dreifußes AD-12 (Abbildung 6.10) der Firma GEO-LASER GMBH (2015).

Der Horizontierungsbereich des automatischen Dreifußes beträgt laut Datenblatt  $\pm 12\text{gon}$  in 2 Achsen und  $\pm 18\text{gon}$  in einer Achse. Bis zu diesen Winkelgrößen können Schrägstellungen (Längs- und Querstellungen) des Roboters ausgeglichen werden. Darüber hinausgehende Roboterschragstellungen würden zu einer Fehlmessung führen, was erst bei der Auswertung



auffallen würde. Im Normalfall ergibt sich eine Längsneigung nur durch das Tunnelgefälle. Bei einer annähernd stabilen Roboterfahrt (Kapitel 6.6.4) ergeben sich nur geringe Querneigungen. Der Rohrstrang ist in Kanalbauprojekten der Emschergenossenschaft gemäß Bauverträge zu jeder Zeit frei von störenden Hindernissen zu halten. Je größer der Tunneldurchmesser ist, desto kleiner werden die Rollwinkel (Abbildung 6.12) und damit die Querneigungen.

Das Tachymeter kann demzufolge auch in einen gewöhnlichen Dreifuß, z. B. in einen Dreifuß GDF321 ohne Lot von LEICA (2016) gesetzt werden. Schrägstellungen in Quer- und Längsrichtung sind nach der Fahrt zu den Prismenringen am Messstandort nicht auszuschließen. In einem autonomen Messverfahren muss zu jeder Zeit gewährleistet sein, dass Schrägstellungen erfasst werden. Mittels Sensoren bzw. mit den Sensordaten werden die Schrägstellungen bei deaktiviertem Kompensator in Korrekturwerte umgerechnet und an Tachymetermesswerte (Horizontal- und Vertikalrichtungen) angebracht. Durch den nicht mehr notwendigen Einsatz des automatischen Dreifußes reduziert sich die Bauhöhe des Robotersystems um 21cm.



Abb. 6.10: Automatischer Dreifuß (GEO-LASER GMBH 2015) und Dreifuß ohne Lot GDF321 (Leica 2016)

## 6.6 Sensoren im Messroboter

Sensoren übernehmen die Aufgabe, den Roboter selbständig im Raum zu positionieren. Hierzu gehören die Fahrt zum Tachymeterstandpunkt und die Erfassung von möglichen Roboterschrägstellungen vor dem Prismenring. Für die Erfassungen von Schrägstellungen mit den daraus abzuleitenden Korrekturwerten sind passende Genauigkeiten für die Absteckberechnungen gefordert. Die nachfolgend aufgeführten Sensoren sind hierauf beispielhaft ausgewählt worden. Die Absteckberechnungen unter Einbeziehung der Korrekturwerte werden nur für die Suche der nahen Prismen, d. h. der Prismen 3 und 4, benötigt. Sind die Prismen gefunden, können diese tachymetrisch eingemessen werden. Die Schrägstellung des Tachymeters bzw. die Korrekturwerte für die Suche der übrigen Prismen in 40m Entfernung werden aus den genaueren Tachymeterwinkelmesswerten abgeleitet. Die Tachymetergenauigkeiten sind im Kapitel 7 aufgeführt. Zum Einsatz kommen drei Arten von Sensoren:

1. Inertiales Messsystem INS,
2. Laserscanner und
3. Hodometer,

die in nachfolgender Tabelle zusammengestellt sind.



<b>Orientus</b>			<b>MAB36 SER</b>			<b>Hokuyo</b>		
						<b>UBG-04LX-F01</b>		
Winkelmessgenauigkeit			Winkelbereich			Strecken- genauigkeit		
			360°			S		
						mm		
Statisch /	Roll	0,2°/0,6°	Toleranz	0,2%	von -	60	± 10mm	
Dynamisch	Nick	0,2°/0,6°	Drehzahl		bis	1000		
	Gier	0,2°/1,0°	U/min	6000	von -	1000	±1% von S	
					bis	4095		
Gewicht	gr	25	Gewicht gr	40	Gewicht gr	260		
Größe B,L,H	mm	30x40,8x24	Ø mm	36	Größe mm	60x75x60		

Tabelle 6.2: Auswahl von Robotersensoren

Die Genauigkeiten der Sensoren haben einen direkten Einfluss auf die Korrekturwerte. Die Hersteller bezeichnen die Messabweichungen als Genauigkeiten oder auch als Toleranzen, machen aber keine Angaben zum Vertrauensbereich.

Genauigkeitsangaben werden im geodätischen Umfeld mit Standardabweichungen bezeichnet. Sie werden in der Einheit  $\sigma$  angegeben.  $1\sigma$  bedeutet, dass eine Messung nur eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 68,3% hat. Damit liegt fast jeder 3. Wert statistisch außerhalb des Fehlers. Eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95,45% entspricht  $2\sigma$ .  $3\sigma$  entsprechen einer Wahrscheinlichkeit von 99,73%. Demzufolge liegt die Irrtumswahrscheinlichkeit bei  $2\sigma$  von 0,046% und bei  $3\sigma$  eine von 0,003% vor. HEUNECKE ET AL. (2013) führen an, dass diese Werte für die Beurteilung von Messergebnissen häufig herangezogen werden. Über  $3\sigma$  hinausgehende Abweichungen kommen nicht oft vor. Die  $3\sigma$ -Regel wird als zulässige Maximalabweichung betrachtet.

Da in den Datenblättern die Angaben von Sicherheitswahrscheinlichkeiten in der Regel fehlen, müssen Annahmen getroffen werden, um die Auswirkungen der Sensorgenauigkeiten auf die Prismensuche berechnen zu können. Nachfolgend werden die Genauigkeiten bzw. die Toleranzangaben als Maximalabweichungen in die Berechnungen eingeführt.

### 6.6.1 Inertiales Messsystem

Ein inertiales Messsystem besteht aus einer Kombination von Sensoren wie Beschleunigungssensoren und Gyroskopen. Auf drei zueinander orthogonal stehenden Achsen befinden sich die einzelnen Sensoren (Abbildung 6.11), die eine Überwachung des Bewegungsverhaltens von Körpern bzw. Objekten ermöglichen (FOPPE 2001).

Die Orientierung im Raum erfolgt durch translatorische Bewegungen, d. h. durch geradlinige Bewegungen des ganzen Körpers bzw. Objektes in eine Richtung. Die Beschleunigungssensoren messen die  $a_x$  -  $a_y$  und  $a_z$  - Richtungen. Die rotatorischen Bewegungen des Gyroskops ergeben Kippwinkel. Sie werden als Roll-, Nick- und Gierwinkel  $\Omega_Y$ ,  $\Omega_X$  und  $\Omega_Z$  bezeichnet (WARCHOLIK 2011).

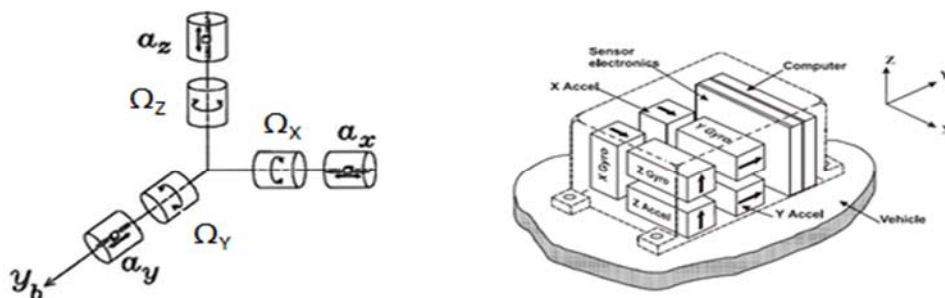


Abb. 6.11: Prinzipieller Aufbau eines Inertialmesssystems in Anlehnung an (FOPPE 2001) und Anordnung der Sensoren in einem inertialen Messsystem (WARCHOLIK 2011)

Bei der technischen Realisierung wird nach FOPPE (2001) zwischen Plattformsystemen und Strapdown-Systemen unterschieden. Während bei den Plattformsystemen die drehraten- und beschleunigungssensitiven Kreisel und Beschleunigungsmesser auf kardanisches gelagerten Plattformen montiert sind und der mechanische Aufwand für die Kardanlagerung sehr groß und zudem teuer ist, sind die Strapdown-Systeme durch Neuentwicklungen viel kleiner, leichter und kostengünstiger geworden (FOPPE 2001).

Die Sensoren werden in einem Strapdown-Inertialsystem parallel zu den Achsen des bewegten Körper fest verbunden, wodurch auf die aufwendige Kardanlagerung verzichtet werden kann. Nachteilig wirkt sich bei den Sensoren im Low-cost-Bereich die Sensordrift aus. WENDEL (2007) führt an, dass zusätzliche Messungen mit GPS-Empfängern für eine Korrektur der Navigationslösung herangezogen werden, insbesondere in der Luftfahrt. Die Positionsfehler, die sich aufsummieren, können dadurch kompensiert werden.

Im Indoorbereich können auf Grund der Abschirmung die globalen Navigationssysteme nicht eingesetzt werden. Im Falle der Kontrollvermessungen im Tunnel kommen zum INS die unter Punkt 2 und 3 genannten Sensoren zum Einsatz.

Bei der Wahl des INS und der nachfolgend aufgelisteten weiteren Sensoren sind die Genauigkeiten wichtige Parameter. Das in Tabelle 6.2 aufgeführte inertielle Messsystem *Orientus*, zeichnet sich z. B. durch hohe Winkelmessgenauigkeiten aus (ADVANCED NAVIGATION 2013). Die statischen Messgenauigkeiten werden für die Suche der Prismen 3 und 4 näher betrachtet (Kapitel 6.10).

### 6.6.2 Laserscanner

Zwei Laserscanner, die sich vorne und hinten auf dem Chassis befinden, übernehmen die Aufgabe, den Messroboter mittig durch den Tunnel zu lenken. Der in Tabelle 6.2 aufgelistete Scanner von *Hokuyo* hat einen Öffnungswinkel von 240° (HOKUYO 2017). Mit ihm werden die

seitlichen Abstände zu den Tunnelinnenwänden gemessen wie in der Abbildung 6.33 dargestellt. Der Messbereich wird laut Datenblatt mit 4m angegeben. Im Datenblatt wird darauf hingewiesen, dass der Scanner nur im Indoorbereich eingesetzt werden kann.

### 6.6.3 Hodometer

Positions- oder Stationsbestimmungen erfolgen durch Hodometer, wie beispielhaft der *MAB36 SER* von MEGATRON (2015). Von einer festen Startposition zu einer Zielposition wird die Wegstrecke mit Hilfe der Anzahl der Umdrehungen der Achsen in Abhängigkeit der Raddurchmesser ermittelt. Mit zunehmender Dauer der Fahrt werden durch äußere Einflüsse die Positionen immer ungenauer. LUTZ (2008) führt als Fehlerquellen eines Hodometers an, dass sich eine Änderung des Abrollumfangs durch das Gewicht des Fahrzeugs ergeben kann und dass eine Abnutzung und eine Verformung der Reifen zu einer Ungenauigkeit führt. Eine Veränderung der Fahrbahnoberfläche durch Feuchtigkeit kann ebenfalls zu einer Änderung des Reibkontaktes (Schlupf) führen. Dadurch kann es zu unterschiedlichen Radumdrehungen kommen. Die Fahrbahnoberfläche entspricht beim Rohrvortrieb der Betonsohle des Rohres. Gegebenenfalls führt das zu einer veränderten Position des Fahrzeugs bzw. des Messroboters im Raum. Im Kapitel 6.7.4 wird die notwendige Kalibrierung beschrieben.

### 6.6.4 Roboterfahrstabilität im Tunnel

Die Größe des Rollwinkels  $\Omega_Y$  aus den Gyroskopwerten ist, wie zuvor erwähnt, für die seitliche Stabilität während einer Roboterfahrt wichtig. Die Festlegung der seitlichen Ausschwenkung, die maximal eintreten darf, richtet sich nach den Bedingungen der Infrastruktureinrichtungen in der Vortriebshaltung (Abbildung 6.12). Die Auflageflächen bzw. Halterungen für die Rohrleitungen und Kabel werden beim hydraulischen Vortrieb z. B. durch senkrechte Streben, welche auf dem Spannring fest montiert sind, gestützt. Der Abstand der Stützen oder der Halterungen ist je nach Tunneldurchmesser unterschiedlich groß. Dieser Abstand bestimmt maßgeblich die Breite des Verschwenkungsbereiches, d. h. die seitlichen bzw. linken und rechten Abstände von der Tunnelachse. Er beträgt bei kleinen Tunneldurchmessern z. B. bei einem DN1800 etwa 80cm. Mit der Breite des Roboters von 53cm stehen als Verschwenkungsmaß in diesem Fall zu beiden Seiten 13cm zur Verfügung.

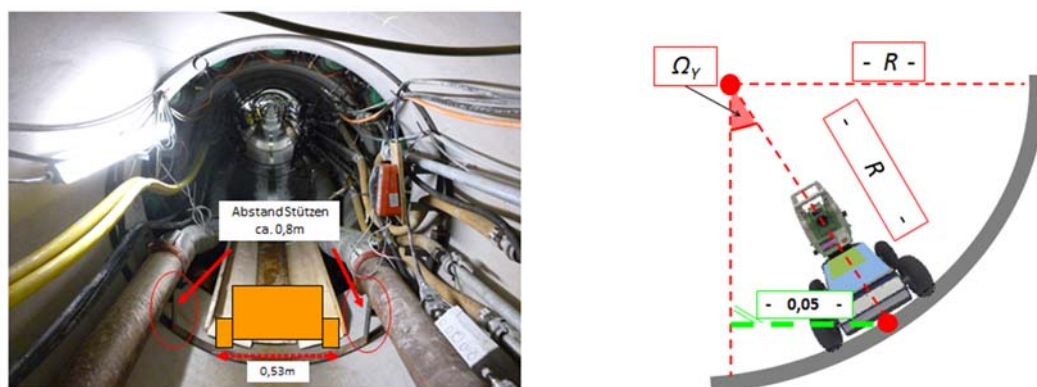


Abb. 6.12: Festlegung der seitlichen Verschwenkung

Zur Sicherheit einer ungestörten Durchfahrt wird ein Korridor von  $\pm 5\text{cm}$  zur Tunnelachse bestimmt. Damit ergibt sich die Größe des einzuhaltenden Rollwinkels  $\Omega_Y$  in Beziehung zum Radius  $R$  des Tunnelrohres zu:

$$\Omega_Y = \arcsin \frac{0,05}{R} \quad (6.1)$$

Bei Erreichen des  $\Omega_Y$  - Wertes erfolgt eine Rückführung in die Ausgangsstellung, um wieder die Tunnelachse zu erreichen.

Eine Ausschöpfung des Korridors von  $\pm 5\text{cm}$  führt nur zu einer rechnerischen Verlängerung der Fahrstrecke (Abbildung 6.13). Würde der Roboter innerhalb einer Rohrlänge von z. B. 4m zur linken Seite ausschwenken, dann über zwei Rohrlängen zur rechten Seite und anschließend wieder über die nächsten zwei Rohrlängen zur linken Seite fahren, ergäbe sich eine Streckenverlängerung  $S_v$  bei einer Fahrstrecke von 40m von einem Roboterstandpunkt zum nächsten von 0,3cm, was praktisch ohne Belang ist. Die Verlängerungsstrecke wurde vereinfacht als Gerade zu Grunde gelegt (grüne Linie).

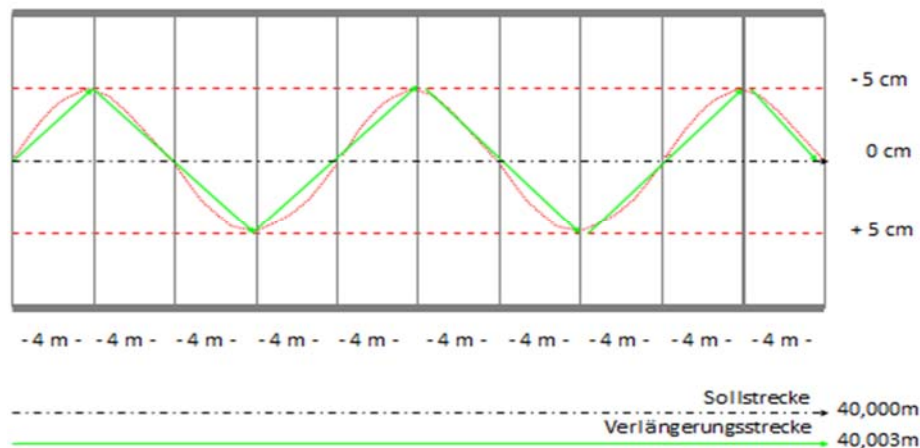


Abb. 6.13: Streckenverlängerung  $S_v$  durch nicht lineare Roboterfahrt

Die zwei Lasersanner von Hokuyo (Tabelle 6.2) haben laut Datenblatt eine Genauigkeit von  $\pm 10\text{mm}$  bei einer Messstrecke bis 1m. Im Projekt Abwasserkanal Emscher mit Rohrdurchmessern bis DN2800 bleibt der seitliche Abstand zur Tunnelinnenwand bei einer Sensoreinbauhöhe von 40cm unter einem Meter (Abbildung 6.14). Bei einer möglichen Schrägstellung (Kapitel 6.10.1) kann die Messstrecke größer als ein Meter werden. Die Genauigkeit berechnet sich dann nach Tabelle 6.2 mit dem Betrag von 1% der Messstrecke.

Die Position der Laserscanner muss sich nicht, wie unten dargestellt, auf dem Chassis befinden. Die Scanner können auch höhenvariabel an den Stirnseiten des Roboters, abgestimmt auf die Tunnelinfrastruktur, positioniert werden. Je geringer der Abstand der Scanner zur Rohrsohle ist, desto kleiner werden die seitlichen Messstrecken. Dann gelten die Genauigkeiten von genannten  $\pm 10\text{mm}$  bei Messstrecken bis 1m.

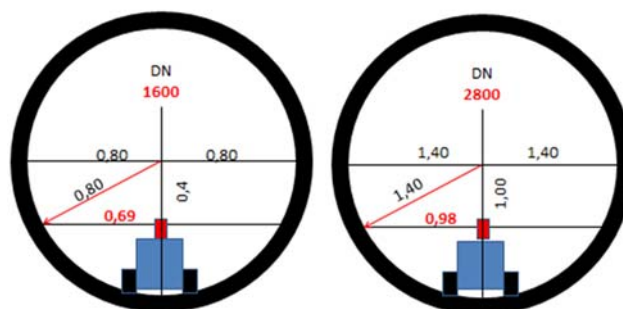


Abb. 6.14: Seitliche Lasermessstrecken in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser und Sensoreinbauhöhe



## 6.7 Vorbereitende Arbeiten für die autonome Messfahrt

Die Messroboterfahrt und der zugehörige Messablauf für die Feststellung von Lage- und Höhenabweichungen zur Solltrasse basiert auf im Rohrstrang montierten Messprismen, wie in den Abbildungen 6.2.1 – 6.2.6 dargestellt. Die Messprismen, als Doppelprismen konstruiert, bilden Messpunktfelder als Teil des Vortriebsnetzes.

Die Rohrvortriebskontrollvermessung wird durchgeführt, wenn der Vortrieb ruht, da sonst die Verbindung zum Grundlagennetz nicht mehr gegeben wäre. Bei den herkömmlichen Kontrollvermessungen werden die Stative im Rohr so aufgebaut, dass eine Sichtverbindung zwischen den Messpunkten besteht, wie in den Beschreibungen der Vortriebsnetze schon ausgeführt. Im Verfahren mit den Messwagen in Verbindung mit Spannringen und Konsolen müssen die Einbauorte der Ringe stationsmäßig vorberechnet werden, damit die gleichen Voraussetzungen (Sichtverbindungen) wie bei der herkömmlichen Vermessung vorliegen. Bei dem im Kapitel 5.2 vorgestellten Verfahren mit Messwagen und Messeinrichtungen (Frösche), die über temporäre Messpunkte aufgestellt werden, liegen Verhältnisse vor, die wieder denen der herkömmlichen Vermessungen gleichen. Die Stativaufstellungen werden so durchgeführt, dass auch hier die nötigen Sichtverbindungen bestehen.

Das autonome Verfahren benötigt ebenfalls eine Vorausberechnung der Messprismenpositionen. Die Prismen verbleiben während des gesamten Vortriebes in den Druckübertragungsringen.

### 6.7.1 Zielweitenberechnung

Das Messkonzept sieht vor, dass von jeder Tachymeterposition 3 Prismenringe angemessen werden können, die im Abstand von 40m im Rohrstrang eingebaut werden. Die Zielstrahlen des Tachymeters sollen dabei wegen möglicher Refraktionen einen Mindestabstand zu den Tunnelwänden nicht unterschreiten, der bei 25cm liegt. Mit dieser Größe wird die Stationsberechnung und Festlegung der Doppelprismen anhand der geplanten Trasse durchgeführt. Die Abstände bzw. Zielstrahlweiten  $Z$  vom Tachymeter zu den Doppelprismen sind abhängig von den Trassierungselementen. Je kleiner der Radius eines Kreisbogens, desto kürzer werden die Zielstrahlweiten.

Die Messprismenpositionen ergeben sich an den jeweiligen Rohrstationen aus den Festlegungen der Abbildung 6.8. In der nachfolgenden Abbildung 6.15 sind die Maße dargestellt, die für die Zielweitenbestimmung benötigt werden. Hierzu gehört der horizontale Abstand zwischen dem Rohrmittelpunkt und dem Lotfußpunkt des Doppelprismas mit 0,38cm und dem Abstand von 25cm (Prismenhalterlänge  $P_h$ ) von der Tunnelinnenwand. Daraus ergeben sich die in der Abbildung 6.16 aufgeführten verschiedenen Radien.

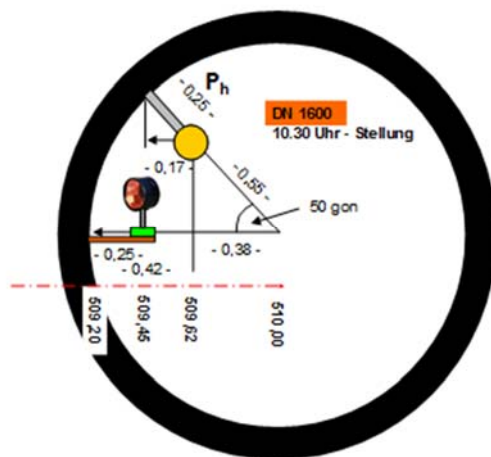


Abb. 6.15: Messprismenpositionsmaße für Beispiel DN 1600

Die Zielweitenberechnungen ändern sich je nach Durchmesser der Tunnelrohre. Bei allen Durchmessern (im Emscherprojekt bis DN2800) wird die Prismenhalterlänge  $P_h$  von 0,25cm Länge möglichst beibehalten, ebenso die Anordnung der Prismen im Rohr im Uhrzeigersinn.

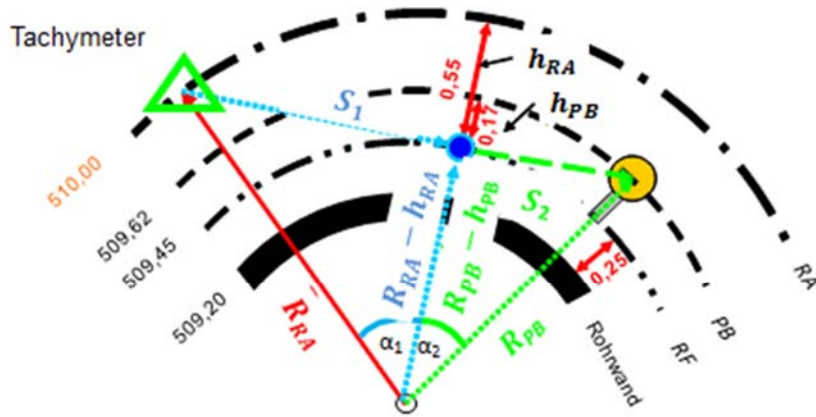


Abb. 6.16: Zielweitenberechnung für Beispiel DN 1600

Die Zielweitenbestimmung erfolgt durch die Berechnung der Teilsehnenlängen  $S_1$  und  $S_2$  (Abbildung 6.16), die zusammen die Zielweite  $Z$  ergeben. Auf Grund der unterschiedlichen Radien (Refraktionsbogen  $RF$ , Prismenbogen  $PB$  und Rohrachse  $RA$ ) ergeben sich unterschiedliche Bogenhöhen  $h$  ( $h_{RA}$ ,  $h_{PB}$ ).

Die Teilsehnenlängen errechnen sich zu:

$$S_1 = R_{RA} * \sin \alpha_1 \quad (6.2)$$

und

$$S_2 = R_{PB} * \sin \alpha_2$$

mit

$$\alpha_1 = \arccos \frac{R_{RA} - h_{RA}}{R_{RA}},$$

und

$$\alpha_2 = \arccos \frac{R_{PB} - h_{PB}}{R_{PB}}, \quad (6.3)$$

wobei

$$R_{RA} - h_{RA} = R_{PB} - h_{PB}.$$

Die Bogenhöhen  $h_{RA}$  und  $h_{PB}$  berechnen sich zu:

$$h_{RA} = R_{RA} - R_F \quad \text{und} \quad h_{PB} = R_{PB} - R_F \quad (6.4)$$

Die Zielweite  $Z$  ergibt sich zu:

$$Z = S_1 + S_2 \quad (6.5)$$

Der größtmögliche Prismenringabstand innerhalb eines Trassierungsbogens ergibt sich aus der maximal größten Zielweite und legt die Positionierung der Messprismenringe für diesen Bogen und alle davor liegenden Trassierungselemente fest.

Eine graphische Überprüfung der Prismenpositionen erfolgt mittels CAD-System (Abbildung 6.17). Dabei ist darauf zu achten, dass der Zielstrahl innerhalb der rechten und linken Refraktionslinie verläuft. Anschließend werden die Prismenpositionen im Rohrverlegeplan (Abbildung 6.18) an den entsprechenden Stellen der Druckübertragungsringe eingetragen.

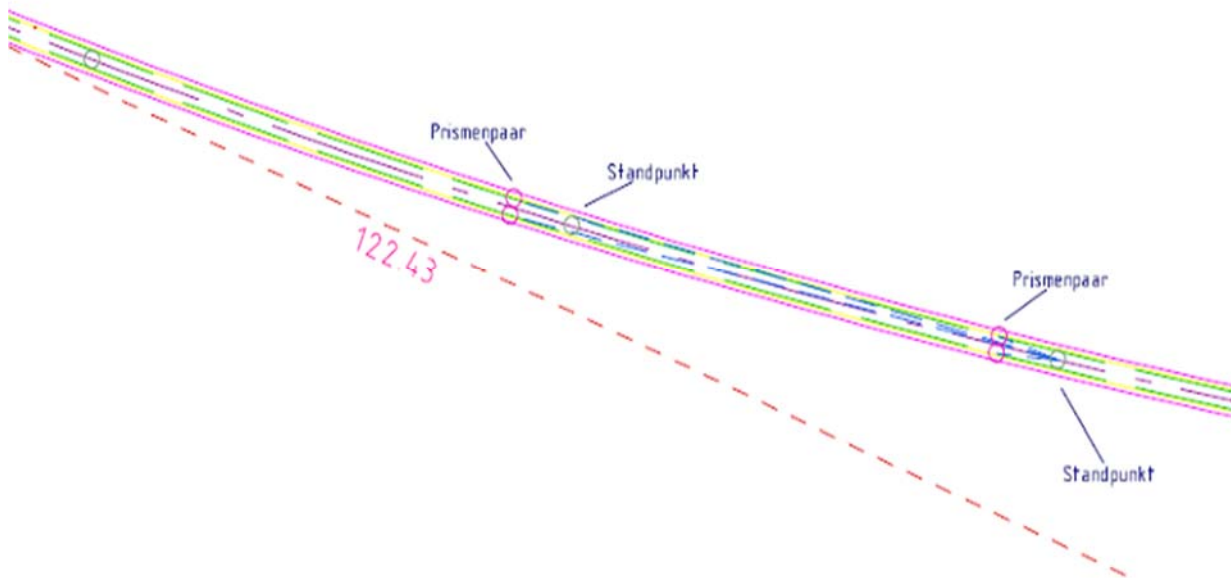


Abb. 6.17: Graphische Überprüfung der Prismenstationen

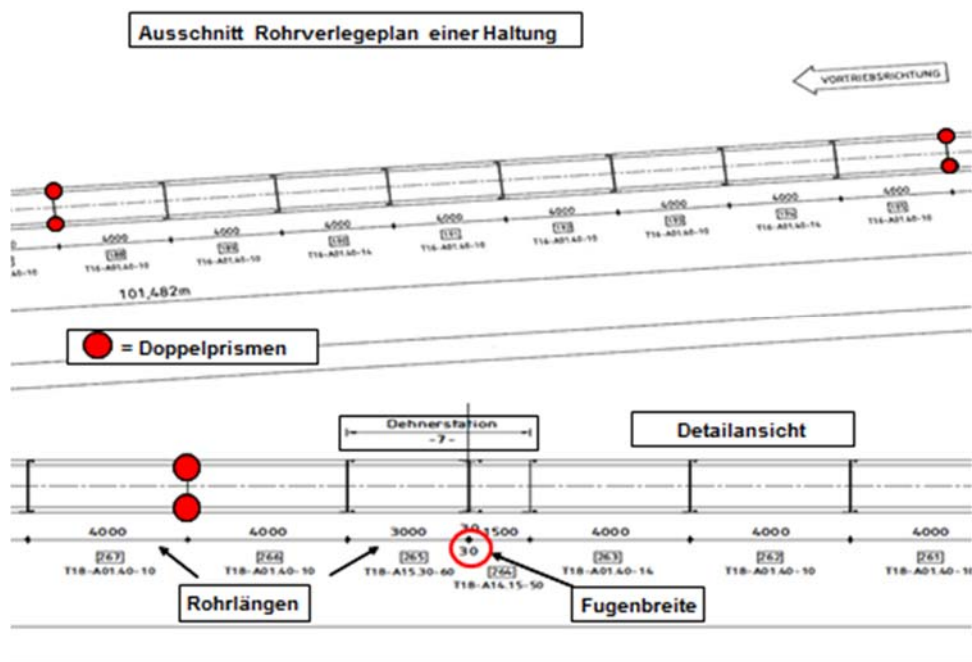


Abb. 6.18: Rohrverlegeplan Baufirma Wayss&Freytag, Beispiel Eintragung Messprismenstationen

Der Rohrverlegeplan wird von der bauausführenden Firma auf Basis der geplanten Tunnelachse aufgestellt. In diesem ist jedes zu verlegende Rohr mit seiner Länge und einer fortlaufenden Nummer eingetragen. Die Nummerierung stimmt mit den vor Ort bereit liegenden Betonrohren überein. In den Rohrverlegeplan werden die Fugenbreiten und die Zwischendehnerstationen eingetragen. Die Zwischendehnerstationen werden im nicht ausgefahrenen Zustand im Plan eingetragen.



Anhand des Rohrverlegeplans werden sämtliche Rohrlängen, Rohrnummern, Fugenbreiten und die Dehnerstationen tabellarisch in eine Excelliste übertragen (Tabelle 6.4). Die im Rohrverlegeplan festgelegten Prismenpositionen werden durch ein „X“ kenntlich gemacht. In dem Beispiel wurde die Prismenposition zwischen den Rohren 95 und 96 festgelegt. Mit der Aufsummierung der einzelnen Rohrlängen und der Rohrfugenbreiten ergeben sich die Stationen der Prismenringe. Beide Prismen eines Prismenringes haben die gleiche Station. Neben der Stationsberechnung sind die seitlichen Abstände der Prismen von der Rohrachse und die Höhe der Prismen über der Rohrsohle  $RS$  zu bestimmen. Aus der Konstellation durch die Festlegung innerhalb des Rohres mittels „Uhrzeit“ werden für die erstmalige Berechnung der Näherungskordinaten gleiche Abstände zum linken Prisma mit  $\Delta y$  und zum rechten Prisma ebenfalls mit  $\Delta y$  sowie  $\Delta h$ , dem Höhenunterschied zwischen den Prismen und dem Rohrmittelpunkt (Tabelle 6.5) eingeführt.

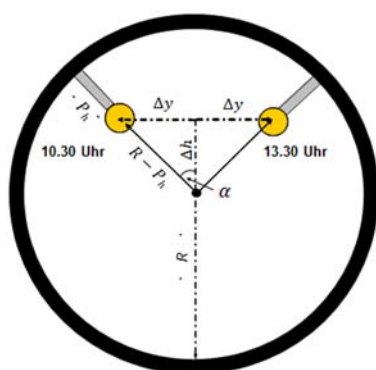
$$\Delta y = \sin \alpha * (R - P_h), \quad (6.6)$$

$$\Delta h = \cos \alpha * (R - P_h), \quad (6.7)$$

mit

$$\alpha = 50 \text{ gon}.$$

Die Höhe der Prismen über der Rohrsohle  $\Delta h_{RS}^P$  errechnet sich aus  $\Delta h$  und dem Radius  $R$  des Rohres.



$P_h$ 0,25	$\Delta h_{RS}^P$ Prisma über RS				
DN	R	$R - P_h$	$\Delta y$	$\Delta h$	
1600	0,800	0,550	0,389	0,389	1,189
1800	0,900	0,650	0,460	0,460	1,360
2000	1,000	0,750	0,530	0,530	1,530
2200	1,100	0,850	0,601	0,601	1,701
2400	1,200	0,950	0,672	0,672	1,872
2600	1,300	1,050	0,742	0,742	2,042
2800	1,400	1,150	0,813	0,813	2,213

Tabelle 6.5: Ordinaten- und Höhenberechnung als Grundlage für die Bestimmung von Näherungskordinaten

Für die Bestimmung der Näherungskordinaten ist zu analysieren, auf welchem Trassierungselement, Gerade oder Kreisbogen, sich die Prismenpaare und Roboterstandpunkte befinden. Die Abbildung 6.19 zeigt ein Prismenpaar z. B. bei der Station 0,1+20. Die Stationsdifferenz zwischen dem Ende der Geraden bei 0,1+10 und dieser Station ergibt sich zu 10m. Da dieser Wert positiv ist (die Stationen der Trassenhauptpunkte werden als Ist-Werte in die Berechnung eingeführt), fällt die Prismenstation nicht mehr auf die Gerade (die Stationen sind als grüne Punkte in den folgenden zwei Abbildungen gekennzeichnet). Folglich fällt das Prismenpaar in den Bogen. Die Differenz zwischen der Prismenstation (Soll-Wert) von 0,1+20 und dem Bogenende bei 0,1+70 ergibt einen negativen Wert von 50m. Damit liegt das Prismenpaar auf dem Bogenelement. Auf Basis derartiger Abfragen werden sämtliche Prismenpaare den Trassierungselementen zugeordnet.



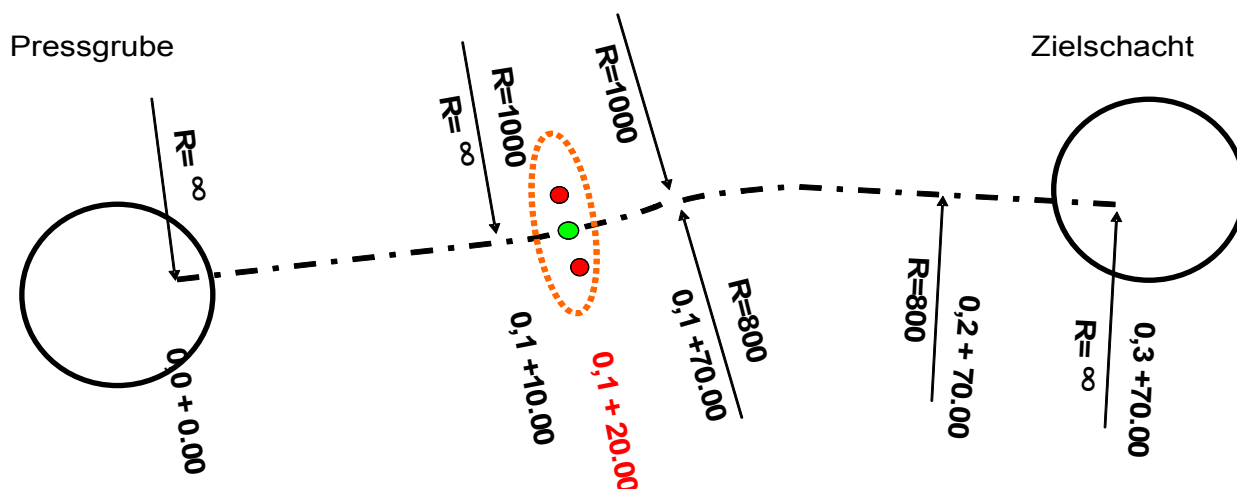


Abb. 6.19: Prismenzuordnung auf Tunnelachse

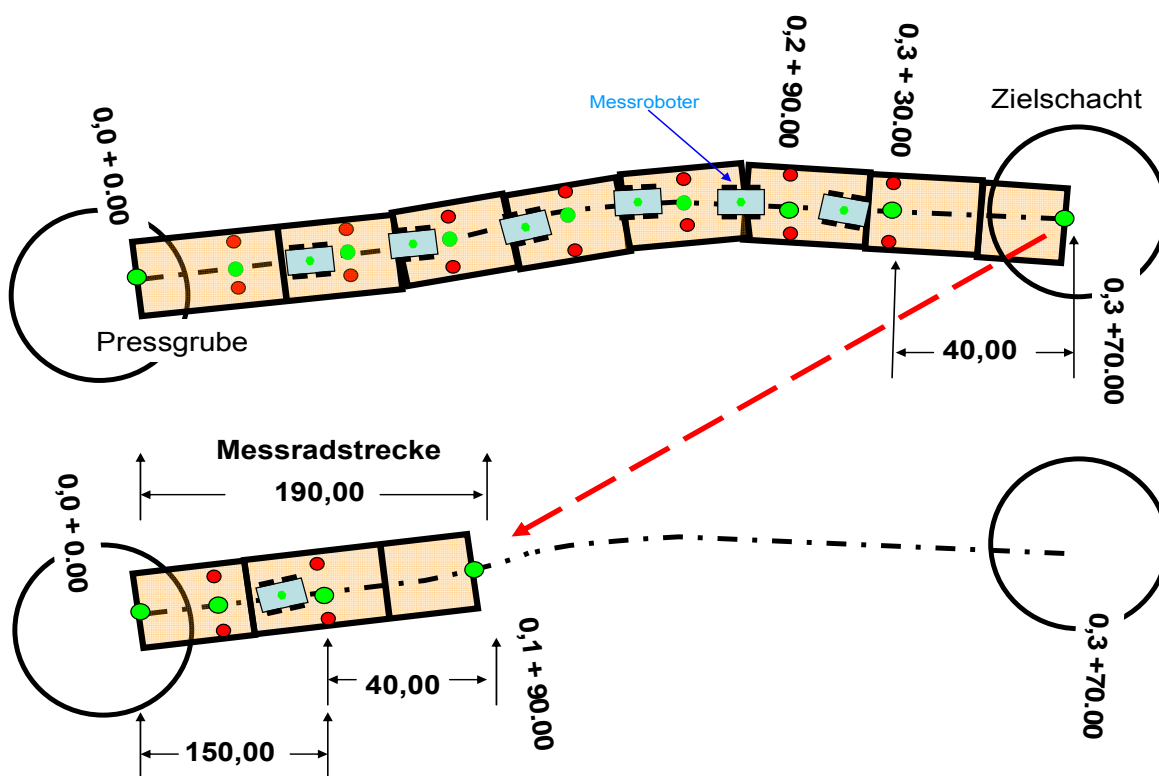


Abb. 6.20: Prismen- und Messroboterkoordinierung im Endzustand (oben) und aktueller Rohrvortrieb (unten)

Mit der Kenntnis, auf welchem Trassierungselement sich die Messprismen befinden, können diese auf Geraden durch gewöhnliche Kleinkpunktberechnungen koordiniert werden, wobei die seitlichen Abstände  $\Delta y$  der Prismen von der Achse für die Berechnung entsprechend den Vorzeichen zu berücksichtigen sind (Berechnung von seitwärts gelegenen Punkten). Für

Messprismen in Bögen findet die Koordinierung mit Hilfe von Kreisbogenberechnungen statt. Dabei ist zu berücksichtigen, ob es sich um Links- oder Rechtsbögen handelt. Angaben hierzu finden sich in der Koordinatentabelle der Achshauptpunkte gemäß Tabelle 6.3, in der vor dem Radiuswert das Vorzeichen mitgeführt wird. Ein negativer Wert bedeutet einen Linksbogen, ein positiver entsprechend einen Rechtsbogen in Stationierungsrichtung gesehen. Zusätzlich zur Koordinierung der Messprismen werden die Positionen der Messroboterstandpunkte 4m vor einem Prismenring vorberechnet. Die Prismenhöhen berechnen sich mit dem Sohlgefälle, der Prismenstation und den Höhenunterschieden der Prismen über der Rohrsohle laut Tabelle 6.5. Die Ergebnisse der Berechnungen sind koordinierte Messprismen und Roboterstandpunkte für den gesamten geplanten Rohrvortrieb. Für die Berechnungen der ersten Prismenpositionen einer begonnenen Vortriebsmaßnahme ist die Länge des aktuellen Vortriebs durch Ablesung am Wegmessrad zu ermitteln, welches an der Brillenwand im Startschacht montiert ist und auf dem Scheitel des Vortriebsrohres aufliegt (Abbildung 4.7). Im Beispiel ist die Messradstrecke mit 190,00m gemessen worden (vorstehende Abbildung 6.20, unterer Teil). Die Stationsdifferenz zwischen dem Haltungs-ende bei 0,3+70 und dem Prismenpaar in der Station 0,3+30 errechnet sich zu 40m. Somit liegt das erste Prismenpaar im aufgefahrenen Bereich vom Startpunkt in der Pressgrube aus bei einer Station von 0,1+50 (190,00m – 40,00m). Dieser Wert wird in die Koordinatenberechnungen der Messprismen eingeführt.

Sobald die Koordinaten der Messprismen nach einer Kontrollvermessung erstmalig im Vortriebsnetz vorliegen, können die Rohrsohlenkoordinaten an den Prismenringstationen nach Kapitel 6.7.3 berechnet werden. Mit den Koordinaten werden die Lagedifferenzen (Abbildung 6.65) und die Höhendifferenzen zwischen der Soll - und Istachse berechnet. In Diagrammform zeigt sich der aktuelle höhen- und lagemäßige Trassenverlauf (Abbildungen 6.66 und 6.67). An jedem Prismenring liegen somit die Lage- und Höhendifferenzen zur Sollachse fest. Mit diesen und den Berechnungselementen  $\Delta y$  und  $\Delta h_{RS}^P$  aus der Tabelle 6.5 werden die Näherungskordinaten der Prismen einer nachfolgenden Kontrollvermessung bestimmt. Die aktuellen Prismenringstationen fallen in der Regel nicht mit den vorherigen Stationen zusammen, sodass die Lage- und Höhendifferenzen der aktuellen Station durch Interpolation der Lage- und Höhendifferenzen der benachbarten Prismenringstationen aus der Vormessung ermittelt werden.

Der Einbau der Messprismen erfolgt im laufenden Vortrieb nach dem Rohrverlegeplan durch Mitarbeiter der Baufirma. In der Regel ist es ausreichend, den Baumitarbeitern eine Liste an die Hand zu geben, in der die Rohrnummern für Montage der Messprismen in den Druckübertragungsring aufgeführt sind. Der Einbau erfolgt mit Hilfe einer dem Rohrdurchmesser angepassten Schablone.

### 6.7.3 Rohrsohlenkoordinatenberechnung

Die Koordinaten der Rohrsohlen an den Prismenringen werden, wie zuvor erwähnt, für die Berechnungen der Lage- und Höhendifferenzen zur Sollachse (Abbildung 6.65) und zur Berechnung der Näherungskordinaten einer Folgemessung benötigt. Die Berechnung der Rohrsohlenkoordinaten für die Bestimmung der Differenzen zur Sollachse wird nicht mit den Werten aus der Tabelle 6.5 durchgeführt, sondern mit den endgültigen Prismenkoordinaten aus dem Vortriebsnetz (Kapitel 6.18).

Die Doppelprismen befinden sich auf einem zur Innenwand des Vortriebsrohres gelegenen Kreis, dessen Radius sich um die Prismenhöhe  $P_h$  reduziert (Abbildungen 6.15 und 6.21).

Für die Berechnung der Rohrsohlenkoordinaten sind folgende Werte gegeben:

- 1.) die Koordinaten  $Y$  und  $X$  der Messprismen 3 und 4 sowie die Höhen  $H_3$  und  $H_4$ ,
- 2.) der Durchmesser  $DN$  des Rohres in Millimeter
- 3.) die Prismenhöhe  $P_h$  (= radialer Abstand der Messprismen von der Rohrwand).

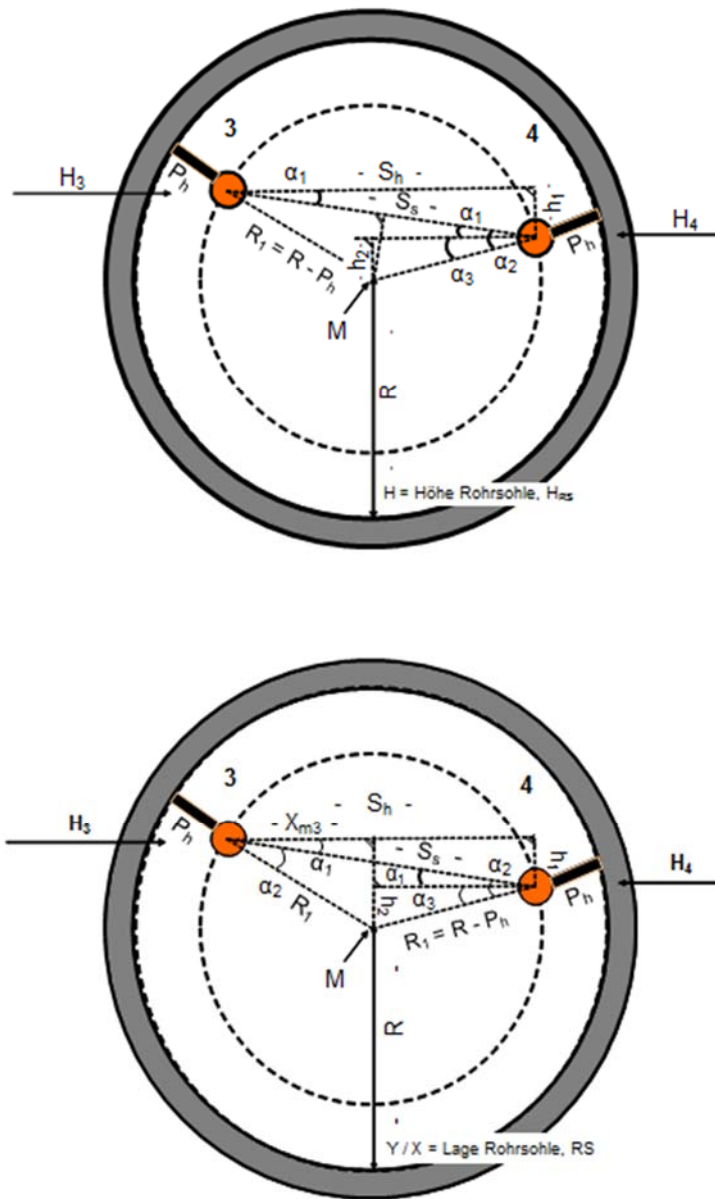


Abb. 6.21: Berechnung Rohrsohlenhöhe und Rohrsohlenlage

Die horizontale Strecke  $S_h$  zwischen den Messprismen 3 und 4 errechnet sich aus deren Koordinaten:

$$S_h = \sqrt{(Y_4 - Y_3)^2 + (X_4 - X_3)^2} \quad (6.8)$$

Mit dem Höhenunterschied  $h_1$  als Absolutwert

$$h_1 = |H_3 - H_4| \quad (6.9)$$

wird die Schrägstrecke  $S_s$  berechnet.

$$S_s = \sqrt{S_h^2 + h_1^2} \quad (6.10)$$

Mit diesen Grundwerten werden die weiteren Berechnungselemente bestimmt (Abbildung 6.21, obere Darstellung).

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{h_1}{S_s} \quad (6.11)$$

und

$$\alpha_2 = \arccos \frac{\frac{S_s}{2}}{R_1} \quad (6.12)$$

mit

$$R_1 = R - P_h \quad (6.13)$$

sowie

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (6.14)$$

und

$$h_2 = \sin \alpha_3 * R_1 \quad (6.15)$$

Ist die Höhe  $H_4 < H_3$  oder ist  $H_4 > H_3$ , dann berechnet sich die Rohrsohlenhöhe  $H_{RS}$  zu:

$$\begin{aligned} H_4 < H_3 : \quad H_{RS} &= H_4 - h_2 - R \\ H_4 > H_3 : \quad H_{RS} &= H_3 - h_2 - R \end{aligned} \quad (6.16)$$

Wenn die Prismen die gleiche Höhe ( $H_3 = H_4$ ) haben, wird die Rohrsohlenhöhe mit den Werten  $\Delta h$  aus Tabelle 6.5 berechnet.

Für die Berechnung der Rohrsohlenkoordinaten  $Y_{RS}$  und  $X_{RS}$  werden die zuvor berechneten Höhenunterschiede  $h_1$  und  $h_2$  sowie die Winkel  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  in die Formel 6.17 eingesetzt, um das Maß  $X_{m3}$  (Abbildung 6.21, untere Darstellung und Abbildung 6.22) zu ermitteln. Bei gleichen Prismenhöhen ( $H_3 = H_4$ ) ist  $X_{m3} = X_{m4} = \Delta y$  aus Tabelle 6.5.

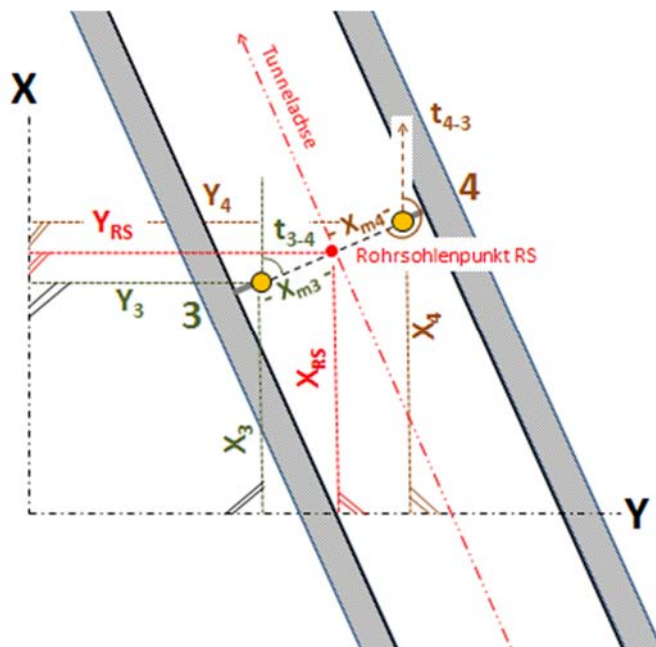


Abb. 6.22: Rohrsohlenkoordinatenberechnung  $Y_{RS}$  und  $X_{RS}$

Ist  $H_4 < H_3$  ergibt sich  $X_{m3}$  zu:

$$X_{m3} = \frac{h_1 + h_2}{\tan(\alpha_2 + \alpha_1)} \quad (6.17)$$

Aus den Koordinatenunterschieden der Messprismen 3 und 4 wird der Richtungswinkel  $t_3^4$  berechnet.

$$t_3^4 = \arctan \frac{Y_4 - Y_3}{X_4 - X_3} \quad (6.18)$$

Die Koordinaten  $Y_{RS}$  und  $X_{RS}$  der Rohrsohle  $RS$  (Abbildung 6.22) ergeben sich zu:

$$Y_{RS} = Y_3 + \sin t_3^4 * X_{m3} \quad (6.19)$$

$$X_{RS} = X_3 + \cos t_3^4 * X_{m3}$$

Ist  $H_4 > H_3$ , werden die Koordinaten mit dem Richtungswinkel  $t_4^3$  und  $X_{m4}$  berechnet.

$$Y_{RS} = Y_4 + \sin t_4^3 * X_{m4} \quad (6.20)$$

$$X_{RS} = X_4 + \cos t_4^3 * X_{m4}$$

### 6.7.4 In-situ Hodometerkalibrierung

Nach der Koordinierung der Messprismen am Pressenwiderlager im Startschacht im Rahmen der Herablegungsmessung mit gleichzeitiger Koordinierung der Messprismen des ersten Prismenringes wird der Messroboter per Lastenkrane auf die Schachtsohle befördert (Abbildung 6.23). Das lässt sich durch die Baufirma leicht durchführen. Auf Grund seines Eigengewichtes von ca. 30 kg kommt manuelles Tragen nicht in Betracht. Der Transport über den im Schacht eingebauten Treppenturm oder durch eingebaute Leitern verbietet sich aus Arbeitsschutzgründen.



Abb. 6.23: Messpersonal und Messroboter auf dem Weg zum Testeinsatz

Der erste Standpunkt des Roboters befindet sich im ersten Vortriebsrohr und dient dazu, eine Kalibrierung des Hodometers durchzuführen. Hierbei wird eine Sollstrecke zu einer gefahrenen Strecke ins Verhältnis gebracht. Das Ergebnis ist ein Fahrdistanzkorrekturwert  $F_k$ . Der Standort des Roboters im ersten Rohr wird definiert, indem die Vorderkante des Chassis bündig mit der Rohraußenkante zusammenfällt. Die Berechnung der Näherungskordinaten erfolgt zuzüglich der Kenntnis des Abstandes von der Vorderkante des Roboters bis zum Tachymetermittelpunkt. Die Kalibrierung beginnt mit der horizontalen Ausrichtung des Messroboters z. B. mit Hilfe einer Röhrenlibelle und der parallelen Roboterstellung zur Tunnelachse. Das Tachymeter wird richtungsmäßig durch Symmetrieabgleich so ausgerichtet, dass



sich zu beiden Seiten des Fadenkreuzes in Vortriebsrichtung gesehen gleiche Abstände zur Tunnelinnenwand ergeben (Abbildung 6.24).

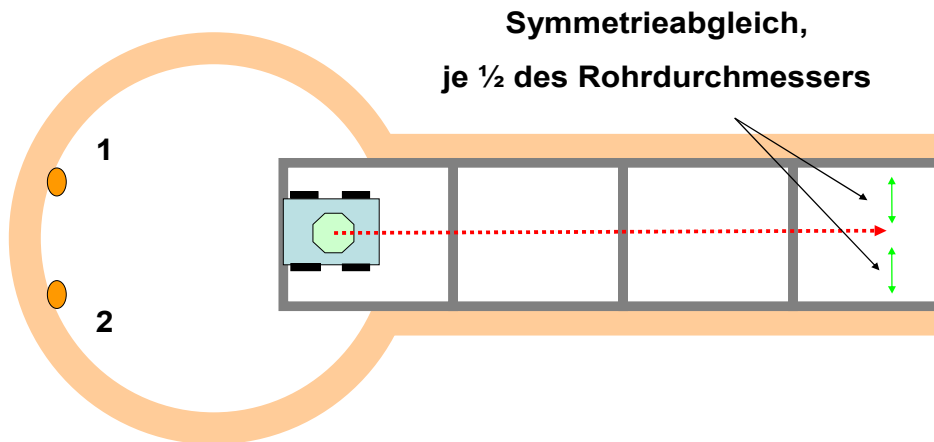
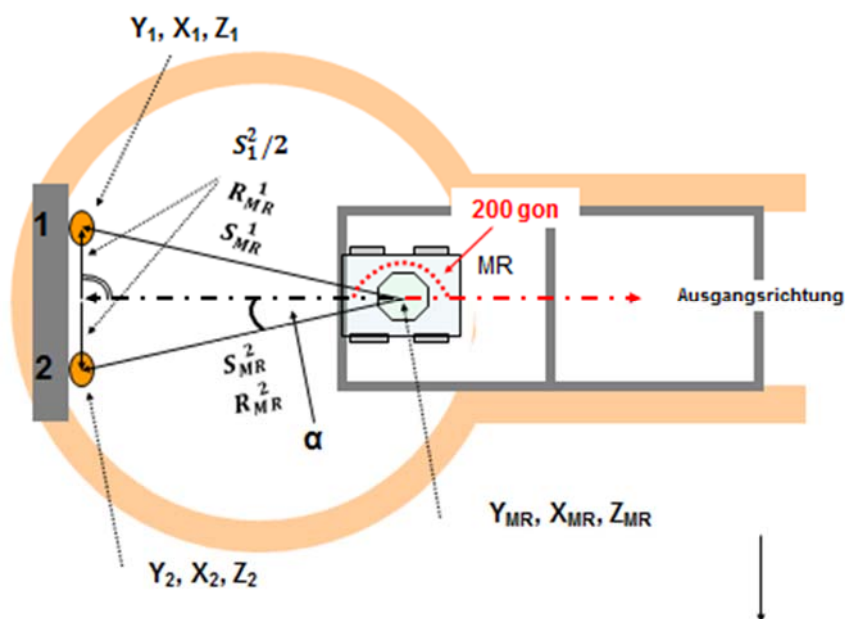


Abb. 6.24: Ausrichtung des Tachymeters

Mit den Tachymeterstandpunktkoordinaten  $Y$ ,  $X$  und Höhe  $Z$  aus der Berechnung der Näherungskoodinaten sowie der Kippachshöhe und den ebenfalls bekannten Koordinaten der Presswandprismen 1 und 2 aus der Herablegungsmessung errechnen sich Absteckeelemente Horizontal- und Vertikalwinkel sowie der Strecken (Abbildung 6.25), die für die Prismensuche benötigt werden. Die Höhe  $Z$  wird in Verbindung mit den Höhen der Presswandprismen nur für die Berechnung der Vertikalwinkel benötigt, um die Tachymetersuche dieser Messprismen zu erleichtern. Für die Fahrdistanzkorrekturbestimmung ist die Höhe nicht erforderlich. Die Schachtprismen an der Pressenwand sind so montiert, dass sie zur rückwärtig in Richtung Pressenwand verlängerten Tunnelachse den gleichen seitlichen Abstand haben (Abbildung 6.5). Der halbe Abstand zwischen den Prismen wird neben der Strecke  $S_{MR}^1$  bzw.  $S_{MR}^2$  für die Berechnung des Winkels  $\alpha$  benötigt.



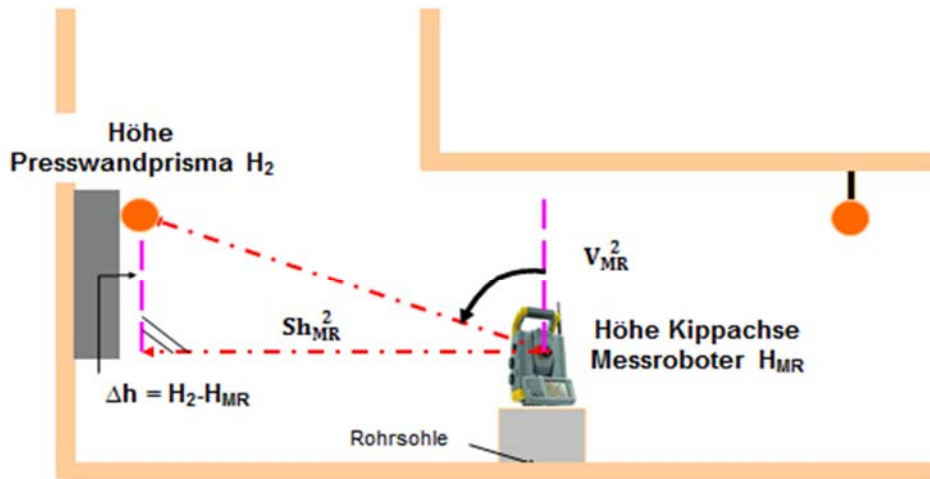


Abb. 6.25: Suchen und Einmessen der Presswandprismen

Für das Prisma 2 ergibt sich der Winkel  $\alpha$  nach vorstehender Abbildung 6.25, oberes Bild zu:

$$\alpha = \arcsin \frac{S_1^2 \cdot \frac{1}{2}}{S_{MR}^2} \quad (6.21)$$

mit

$$S_{MR}^2 = \sqrt{(Y_2 - Y_{MR})^2 + (X_2 - X_{MR})^2}$$

und

$$S_1^2 = \sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2}.$$

Der Vertikalwinkel  $V_{MR}^2$  errechnet sich gemäß Abbildung 6.25, unteres Bild zu:

$$V_{MR}^2 = 100gon - \arctan \frac{\Delta h}{S_{MR}^2} \quad (6.22)$$

mit

$$\Delta h = H_2 - H_{MR}.$$

Der Absteckwinkel bzw. eine abzusteckende Richtung  $R_{MR}^1$  für das Presswandprisma 1 errechnet sich aus dem um den Winkel  $\alpha$  reduzierten gestreckten Winkel von 200gon in Verbindung mit der Ausgangsrichtung. Für die Richtung  $R_{MR}^2$  (Presswandprisma 2) wird der Winkel  $\alpha$  dem gestreckten Winkel von 200gon hinzugefügt.

$$R_{MR}^1 = 200gon - \alpha \quad (6.23)$$

$$R_{MR}^2 = 200gon + \alpha \quad (6.24)$$

Nach dem Finden der Prismen werden diese eingemessen. Die gemessenen Strecken  $S_{MR}^1$  und  $S_{MR}^2$  werden mit den vorberechneten Strecken verglichen, um sicherzustellen, dass es sich um die gesuchten Prismen handelt. Ein Differenzwert von  $\pm 10cm$  ist ausreichend. In diesem Bereich kann kein weiteres Prisma vorhanden sein, da die Abmessungen des Prismas mit einem Durchmesser von 6cm und einer Gehäuselänge von 6cm dieses nicht zulassen.

Eine weitere Überprüfung ergibt sich aus einem Vergleich der Strecken zwischen den Prismen 1 und 2. Der Abstand zwischen diesen ist nach der Montage an der Pressenwand einfach bestimmbar (Zollstock). Aus den Messelementen Strecken und Richtungen ist eine

zweite Streckenberechnung mittels Dreiecksberechnung (Dreieck MR-1-2) möglich. Die Differenz beider Strecken darf sich nur im Rahmen der Messgenauigkeit des Tachymeters befinden.

Nachdem die Prismen gefunden und eingemessen worden sind, erfolgt die genaue Koordinierung des Roboterstandpunktes. Mit den gemessenen Werten Schrägstrecken, Vertikal- und Horizontalwinkeln liegen die Berechnungselemente vor, die für eine Koordinierung des Tachymeterstandpunktes mittels geodätischer Berechnungsverfahren benötigt werden. Die Berechnungsverfahren können der Fachliteratur entnommen werden.

Der Roboter verändert im nächsten Schritt seine Stellung 1 entsprechend Abbildung 6.26 durch eine Fahrt von 10m durch die Umdrehungsanzahl  $n$  zu einer Position 2, deren vorläufige Koordinaten ebenfalls wie die Koordinaten des ersten Roboterstandpunktes im ersten Rohr als Näherungskoodinaten ermittelt wurden.

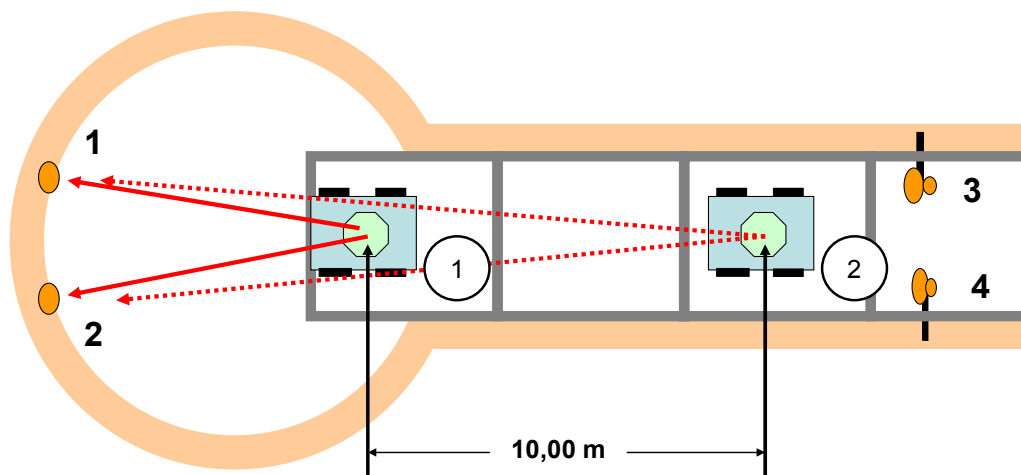


Abb. 6.26: Erste Fahrdistanzkorrekturbestimmung

Es erfolgt erneut eine Berechnung der Absteckwerte zu den Presswandprismen 1 und 2. Nach durchgeführter Prismensuche erfolgt die Einmessung der Prismen. Durch die geodätischen Berechnungen liegen genaue Koordinaten der Roboterposition 2 vor. Aus den vorliegenden Koordinaten der beiden Roboterpositionen 1 und 2 errechnet sich eine Strecke  $S_{ger}$  zwischen diesen zu:

$$S_{ger} = \sqrt{(Y_2 - Y_1)^2 + (X_2 - X_1)^2} \quad (6.25)$$

Die Strecke  $S_{ger}$  ist die Sollstrecke und wird in Beziehung zur gefahrenen Strecke  $S_{gef}$  gesetzt, die sich errechnet aus

$$S_{gef} = d * \pi * n \quad (6.26)$$

mit der Umdrehungszahl  $n$  und dem Raddurchmesser  $d$ . Die gesuchte Fahrdistanzkorrektur  $F_k$  ergibt sich zu:

$$F_k = \frac{S_{ger}}{S_{gef}} \quad (6.27)$$

Mit diesem Fahrdistanzkorrekturwert fährt der Roboter zu seiner nächsten Position. Auf dem Fahrweg zu den jeweiligen weiteren Positionen können sich die Parameter jederzeit verändern, z. B. durch einen Luftdruckverlust. Für eine korrekte Fahrt wird das Hodometer deswegen in jedem Messpunktfeld kalibriert.

Die Kalibrierung erfolgt über die in der Haltung montierten Doppelp Prismen. Die Presswandprismen sind nur für die erstmalige Korrekturwertbestimmung nutzbar. Spätestens bei einem Übergang der in der Geraden geführten Trasse im Anfangsbereich des Vortriebes in einen Bogen ist keine Sichtverbindung mehr zu den Presswandprismen auf Grund der Krümmung vorhanden. Darum wird die Kalibrierung immer innerhalb eines Messpunktfeldes durchgeführt (Abbildung 6.27).

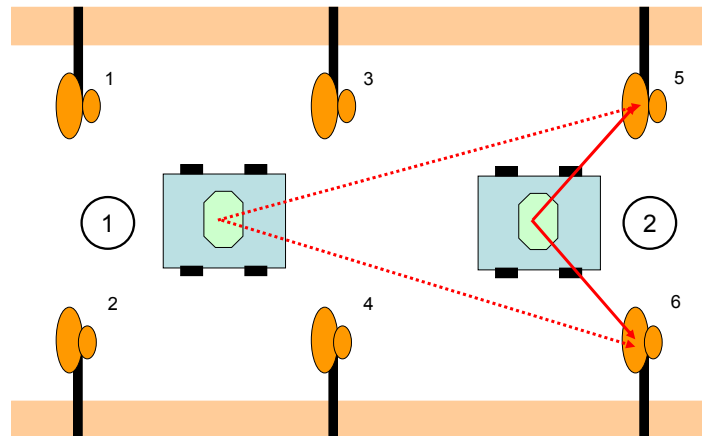


Abb. 6.27: Aktualisierung des Fahrdistanzkorrekturwertes innerhalb eines Messpunktfeldes

Vom Prinzip her wird der zu aktualisierende Korrekturwert genauso ermittelt wie aus der ersten Roboterstellung im Startschacht. Bedingung für die Ermittlung ist auch hier, dass aus beiden Roboterpositionen 1 und 2 jeweils immer nur ein gleiches Prismenpaar gesucht und eingemessen wird (Prismen 5 und 6). Dadurch wird auch immer mit gleichen Koordinaten, die aus der Berechnung der Näherungskordinaten vorliegen, eine Standpunktberechnung für die Roboterpositionen durchgeführt.

### 6.8 Messroboterpositionierung im ersten Messpunktfeld

Nach der Kalibrierung ist zu ermitteln, an welcher Stelle bzw. Station das erste Prismenpaar eingebaut ist. Der Messroboter muss vor diesem Prismenpaar die erste Position einnehmen. Eine für die Berechnung des Korrekturwertes vorgesehene Fahrstrecke von 10m oder jeder sonstigen wählbaren Strecke kann zur Folge haben, dass der Roboter an dem ersten eingebauten Prismenpaar vorbeifährt. Für diesen Sachverhalt sind 2 Fälle zu unterscheiden.

#### 6.8.1 Positionierungsfall 1

In der nachfolgenden Abbildung ist der Messroboter von der ersten Position 10m in den Tunnel gefahren und nimmt die Position 2 ein. Auf dieser Fahrstrecke hat er keinen Prismenring passiert, so dass er den einzunehmenden Standpunkt vor dem Prismenring 3/4 im Abstand von 4m vor diesem in Vorwärtsfahrt erreichen muss. Der Messroboter- bzw. Tachymeterabstand von 4m wird im Kapitel 6.8.3 erklärt. Im Beispiel der Abbildung 6.28, unteres Bild, errechnet sich die Fahrstrecke  $FS$  von Position 2 zum Standpunkt des Messroboters MR zu:

$$FS = S_1^{RS} - 4m - S_1^2 \quad (6.28)$$

mit der Strecke  $S_1^{RS}$  aus der Streckenberechnung mit der Koordinate von Position 1 und der Rohrsohlenkoordinate  $RS$  des Prismenringes 3-4 und der Strecke  $S_1^2$ . Die Z-Koordinate ist für die Fallunterscheidung nicht relevant.

Mit den in der Abbildung eingetragenen Beispielwerten ergibt sich die Fahrstrecke  $FS$  zu  $20,00\text{m} - 4\text{m} - 10,00\text{m} = 6\text{m}$ . Die Berechnung führt zu einem positiven Ergebnis, der Wert ist  $> \text{Null}$ . Immer dann, wenn der Wert positiv ist, muss der Roboter aus der Position 2, an welcher er noch nach der Kalibrierung steht, durch eine Vorwärtsfahrt mit der errechneten Fahrstrecke zum Standpunkt MR vor den Prismenring gefahren werden.

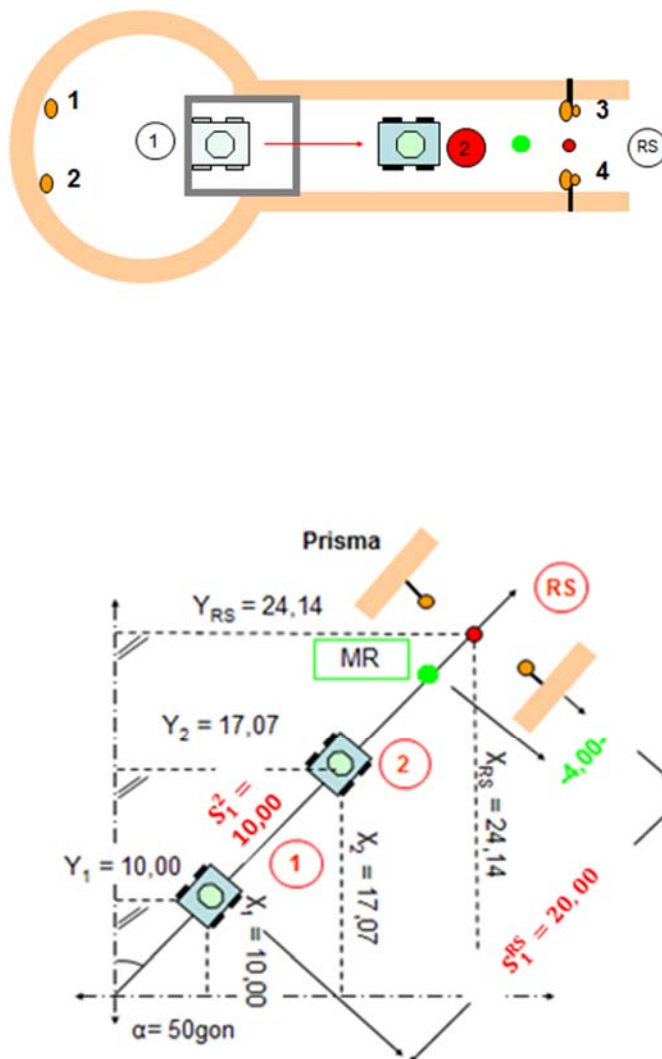


Abb. 6.28: Prismenposition außerhalb des Fahrdistanzkorrekturbereiches



### 6.8.2 Positionierungsfall 2

Der zweite Fall in der Abbildung 6.29 zeigt eine Situation, in der der Messroboter aus der Position 1 an einem schon eingebauten Prismenpaar 3/4 während der 10m-Fahrstrecke vorbeifährt und die Position 2 einnimmt. Im Zahlenbeispiel errechnet sich die Fahrstrecke von der Position 2 aus zum Standpunkt MR zu  $7,00\text{m} - 4\text{m} - 10,00\text{m} = -7\text{m}$ . Analog zu der Aussage, dass ein positiver Wert eine Vorwärtsfahrt zur Folge hat, bedeutet ein Wert  $< \text{Null}$  eine Rückwärtsfahrt.

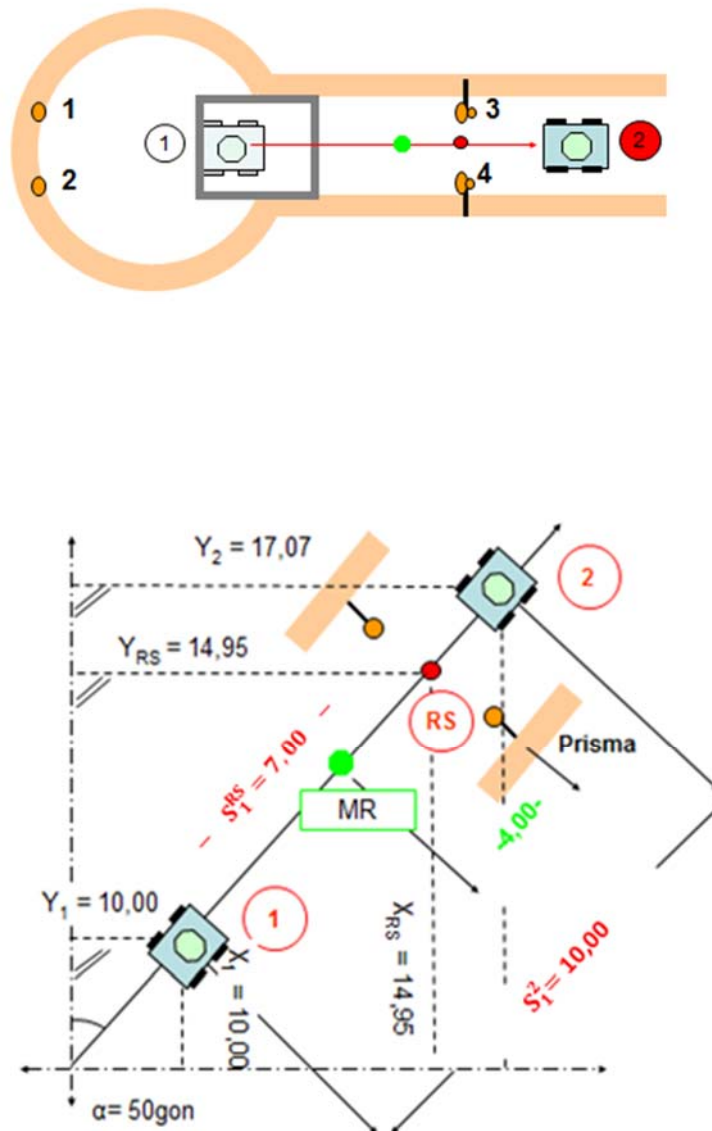


Abb. 6.29: Prismenposition innerhalb des Fahrdistanzkorrekturbereiches

### 6.8.3 Messroboterabstand zum Prismenring

Der Roboter und das Tachymeter nehmen immer eine gleiche Position vor einem Prismenring ein. Der Abstand zum Prismenring muss mindestens so groß sein, wie die kürzeste Messdistanz des Tachymeters. Bei dem Tachymeter TS15 von der Firma Leica beträgt die kürzeste Messdistanz 1,5m (Leica 2010). Der Prismenringabstand wurde mit 4m festgelegt. Damit sind Anzielfehler vollständig eliminiert. Gemäß Diagramm 6.1 und Tabelle 6.6 liegt der Fehler auf Grund der Abweichung aus der Achse bei 0,0 mm.

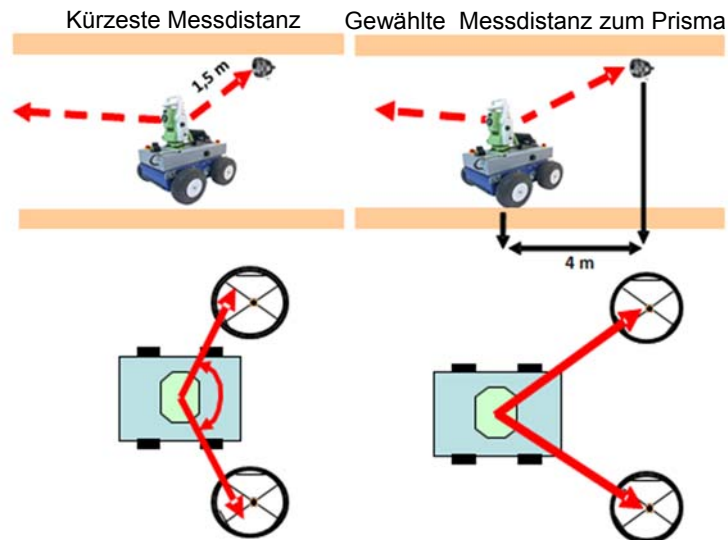


Abb. 6.30: Standortwahl vor Prismenringen

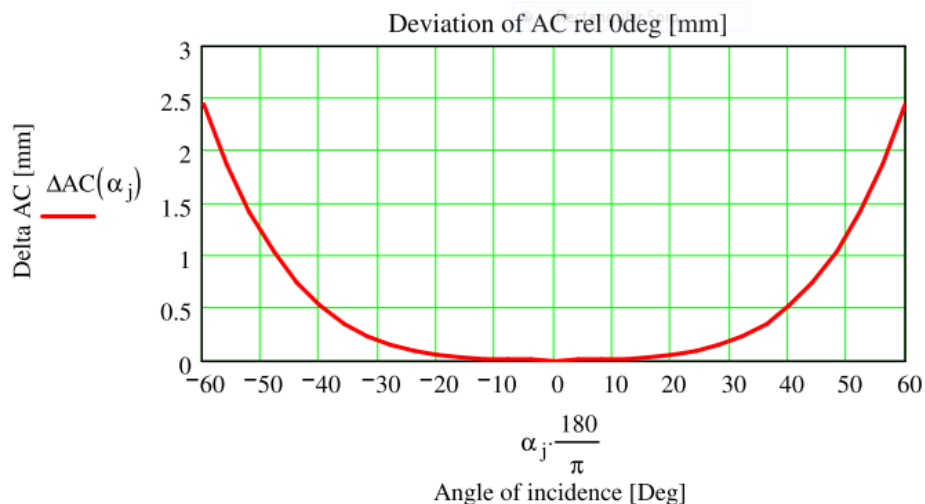


Diagramm 6.1: Abweichung der Achse in Abhängigkeit von der fehlerhaften Ausrichtung eines Leica GPR1 Reflektors (Leica 2009)

Rohr- durchmesser	Seitlicher Prismenabstand zur Tunnelachse*	Abstand Tachymeter / Prisma	Anziel- winkel	Anzielfehler Diagramm 6.1
	$\Delta Y$	S	AZ	
	m	m	Gon/Grad	mm
DN1600	0,4	1,5	16,6/14,9	0,1
DN2800	0,8	1,5	31,2/28,1	0,2
DN1600	0,4	4,0	6,3/5,7	0,0
DN2800	0,8	4,0	12,5/11,2	0,0
*Tabelle 6.5				

Tabelle 6.6: Berechnung des Anzielfehlers bei fehlerhafter Prismenausrichtung

## 6.9 Messungen innerhalb der Messpunktfelder

Im Kapitel 6.1 wurde der gesamte Messablauf vom Beginn der Herablegungsmessung über den ersten Messrobotereinsatz bis zur Einmessung der Messprismen des Navigationssystems für die Vortriebsmaschinensteuerung beschrieben. Jedes Mal hält der Messroboter an definierten Stellen vor den Prismenringen. Hier beginnt der immer wiederkehrende Messablauf innerhalb eines Messpunktfeldes. Wie schon erläutert, werden die Messpunktfelder überlappend aneinander gereiht, so lange, bis das Prismenfeld des Navigationssystems erreicht wurde.

Für das autonome Messverfahren ist grundsätzlich ein freier Raum im Tunnel erforderlich, damit der Messroboter ohne Hindernisse in die einzelnen Messpunktfelder fahren kann. Das ergibt sich aus den Erfordernissen der Mindestlichtmaße. Des Weiteren haben die Sensoren im Roboterchassis die Aufgabe zu erfüllen, den Roboter in der Rohrsohlenmitte zu halten. Dadurch wird eine Messroboterfahrt in einer annähernd horizontalen Stellung durchgeführt. Die durch den Wegfall des automatischen Dreifußes sich zwangsläufig ergebenden Schrägstellungen des Tachymeters finden Berücksichtigung bei der Prismensuche durch darauf angepasste Absteckungsformeln (nachfolgendes Kapitel).

In *Bild 1* (Abbildung 6.31) fährt der Messroboter in ein Messpunktfeld nach der Kalibrierung des Hodometers vor das Prismenpaar 3/4. Aus den Rohrsohlenkoordinaten des anzufahrenden Prismenringes und den Koordinaten des letzten Tachymeterstandpunktes wurde die Fahrstreckenlänge zum Standpunkt des nächsten Messpunktfeldes berechnet. Der definierte 4m-Abstand wurde von der Entfernung Messroboter zum Prismenring in Abzug gebracht, was zu der Fahrstrecke des Roboters führt. Die zu fahrende Strecke für den Roboter wird jedes Mal mit Hilfe des Hodometers (Umdrehungszahl  $n$ ) bestimmt.

Im *Bild 2* steht der Roboter 4m vor dem Prismenring 3/4. Die erste Aufgabe ist es, das Prisma 3 zu erfassen. Für eine Erfassung des Prismas ist der Winkel  $\alpha$  erforderlich. Erst mit dem Finden und anschließendem Einmessen des Prismas 3 ist der weitere Messablauf durchführbar. Deshalb wurde in dem Bild 2 der Winkel  $\alpha$  als besonderes Detail hervorgehoben.

Das *Bild 3* stellt die Suche des Prismas 4 dar. Die Richtung zum Prisma 3 bildet die Grundlage für die Suche und das Einmessen des Prismas 4. Mit den Horizontal- und Vertikalwinkeln und den Schrägstrecken liegen die erforderlichen Berechnungselemente für die Koordinatenbestimmung des Tachymeterstandpunktes vor.

Erst dadurch ist es möglich, die Messprismen 5 und 6 im *Bild 4* zu suchen. Zuerst wird das Prisma 6 vom Tachymeter angefahren, da mit Anzielung des Prismas 4 das Tachymeter schon auf die entsprechende Tunnelseite eingestellt ist. Die Suche erfolgt über eine Horizontal- und Vertikalwinkelabsteckberechnung. Nach dem Einmessen des Prismas 6 wird der Horizontalabsteckwinkel für das Prisma 5 um die Differenz zwischen der vorberechneten und der tatsächlich gemessenen Richtung zu Prisma 6 korrigiert.

Im *Bild 5* zeigt sich die gleiche Situation. Mit den Horizontalkorrektur- und den Vertikalabsteckwerten werden die Prismen 1 und 2 erfasst und eingemessen.

Im *Bild 6* fährt der Messroboter in das nächste Feld 4m vor die Prismen 5 und 6 bzw. 3 und 4, da, wie in Abbildung 6.4 aufgeführt, die Nummerierung der Messprismen nach Beendigung der Messungen innerhalb eines Messfeldes wieder mit der Nummer 1 beginnt. Zuvor wurde das Tachymeter in die Ausgangsrichtung gedreht, die immer erhalten bleibt, da sie sich auf die Roboterlängsrichtung bezieht.

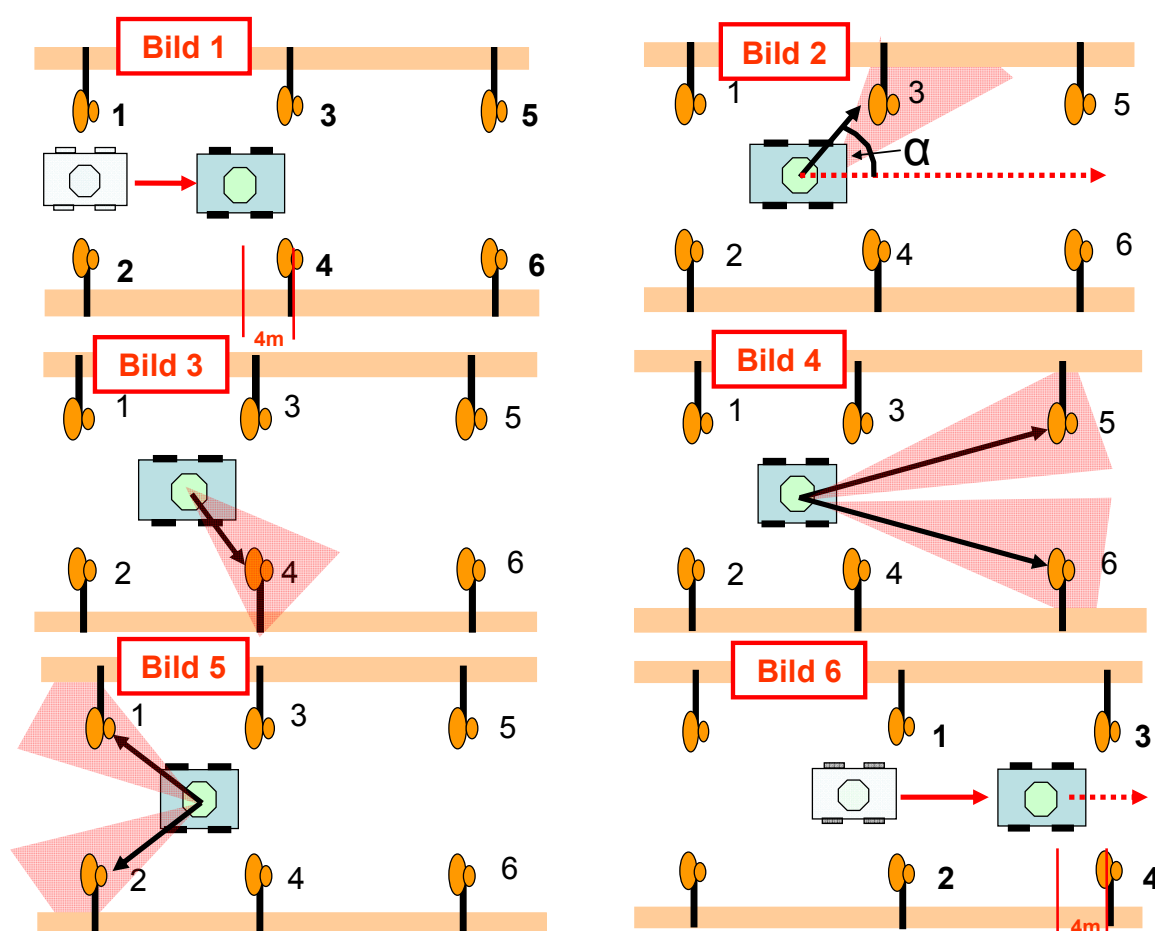


Abb. 6.31: Messablauf innerhalb eines Messpunktfeldes in Einzelschritten

## 6.10 Suche der Messprismen 3 und 4

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist für die Messungen innerhalb eines Messpunktfeldes das Finden des Prismas 3 von essentieller Bedeutung. Erst danach kann das Prisma 4 gesucht werden. Sind beide Prismen gefunden, können die Koordinaten des Tachymeterstandpunktes berechnet werden, damit die übrigen Prismen ebenfalls gefunden und eingemessen werden können.

Der Messroboter fährt 4m vor den Prismenring und nimmt im Idealfall eine Position ein, die genau auf der Tunnelachse liegt. Eine Idealposition für den Roboter vor dem Prismenring wird nur in der Theorie erreicht, in der Regel werden vom Roboter Positionen vor dem Prismenring eingenommen, die sich nicht auf der Tunnelachse befinden. Bedingt durch den Wegfall des automatischen Dreifußes kann das Tachymeter nicht mehr horizontalisiert werden (Kapitel 6.5). Für die Positionierung des Messroboters müssen mit den im Kapitel 6.6 beispielhaft ausgesuchten INS-Sensoren die Roboterquerneigungen und Roboterlängsneigungen erfasst werden. Mit den Messwerten der Laserscanner sind mögliche Roboterquerstellungen zu erfassen. Die Fahrstrecke resultiert aus der Hodometermessung.

### 6.10.1 Roboterschrägstellungen

Die nachfolgende Abbildung zeigt Roboterpositionen, in der der „blau“ dargestellte Roboter auf der Rohrachse steht, der „grün“ dargestellte Roboter eine rechtsseitige Stellung einnimmt und einen „lila“ farbigen Roboter in einer Querstellung. Die verschiedenen Stellungen können links- oder rechtsseitig ausfallen.

Die Roboterschrägstellungen sind:

- Roboterquerstellungen als horizontale Verschwenkungen gegenüber der Tunnelachse, berechnet durch den Winkel  $V_\alpha$  (Abbildung 6.32),
- Roboterquerneigungen als seitliche Lageänderungen in Bezug zur Tunnelachse, berechnet mit  $\Delta\Omega_Y$  (Abbildung 6.32) und
- Roboterlängsneigungen (werden im Kapitel 6.10.5 beschrieben) in Richtung der Tunnelachse.

Die Roboterquerstellungen  $V_\alpha$  und Roboterquerneigungen  $\Delta\Omega_Y$  ergeben mit dem Wert  $\Delta y$  den Winkel  $\beta$ , der für die Bestimmung der Richtung  $R_3$  benötigt wird.

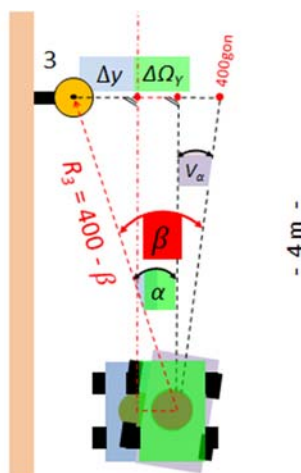


Abb. 6.32: Roboterquerstellung und Roboterquerneigung

### 6.10.2 Roboterquerstellungen

Die Strecken  $S_1$  und  $S_2$  sowie die Strecken  $S_3$  und  $S_4$  sind im Fall der zuvor genannten Idealposition jeweils gleich lang (Abbildung 6.33).



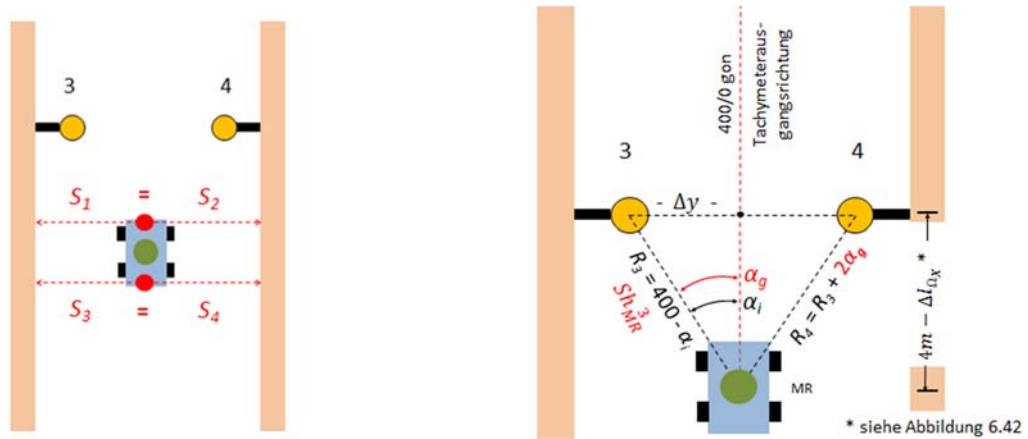


Abb. 6.33: Messroboterposition auf der Tunnelachse und Bestimmung der Richtungen zu den Prismen 3 und 4

Daraus errechnet sich eine vorläufige Richtung  $R_3$  mit Hilfe eines idealen Winkels  $\alpha_i$ , der Strecke  $\Delta y$  (Tabelle 6.5) und dem 4m-Abstand inklusiv der im Kapitel 6.10.7 beschriebenen Lageänderung  $\Delta l_{Ox}$  des Tachymeterzentrums durch Roboterlängsneigungen. Vorläufig deshalb, weil die wahre Entfernung zum Prisma 3 zu diesem Messzeitpunkt noch nicht bekannt ist.

$$R_3 = 400 - \alpha_i \quad (6.29)$$

mit

$$\alpha_i = \arctan \frac{\Delta y}{4 - \Delta l_{Ox}}. \quad (6.30)$$

Eine Roboterquerstellung ergibt sich, wenn die Idealposition nicht erreicht wird. Dann sind die Strecken  $S_1$  und  $S_2$  sowie die Strecken  $S_3$  und  $S_4$  nicht gleich lang. Die nachfolgende Abbildung 6.34 zeigt als Beispiel eine linksseitige Querstellung.

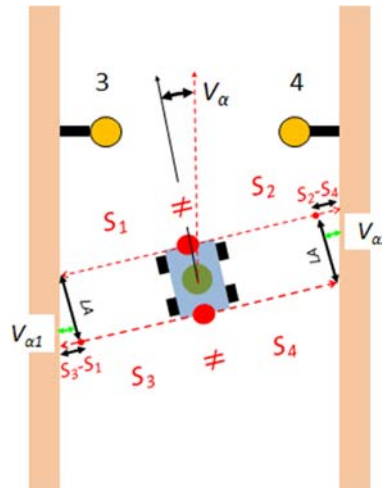


Abb. 6.34: Linksseitige Roboterquerstellung

Der sich daraus ergebene Querstellungswinkel  $V_\alpha$  gegenüber der Tunnelachse wird durch Mittelbildung aus  $V_{\alpha1}$  und  $V_{\alpha2}$  unter Einbeziehung des Laserscannerabstands  $LA$  und den Streckendifferenzen  $S_3 - S_1$  und  $S_2 - S_4$  ermittelt zu:

$$V_\alpha = \frac{1}{2} * (V_{\alpha1} + V_{\alpha2}) \quad (6.31)$$

mit

$$V_{\alpha1} = \arctan \frac{S_3 - S_1}{LA} \quad \text{und} \quad V_{\alpha2} = \arctan \frac{S_2 - S_4}{LA}.$$

### 6.10.3 Roboterquerneigungen

Die Rollwinkel bilden die Grundlage für die Berechnungen von Querneigungen. Eine Roboterquerneigung wirkt sich auf die Lage des Tachymeterzentrums in Bezug zur Tunnelachse aus. Entsprechend der Abbildung 6.35 resultiert hieraus die Lageabweichung  $\Delta\Omega_Y$ .

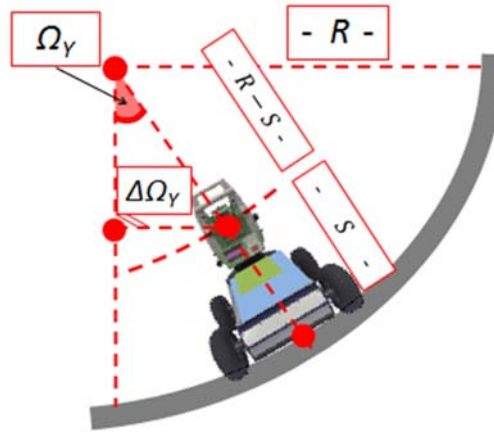


Abb. 6.35: Lageabweichung durch Roboterquerneigung

Die Lageabweichung  $\Delta\Omega_Y$  berechnet sich aus dem Radius  $R$  des Tunnelrohres und der Höhe  $S$  (Formel 6.42) zu:

$$\Delta\Omega_Y = \sin\Omega_Y * (R - S) \quad (6.32)$$

### 6.10.4 Berechnung der endgültigen Horizontalrichtung $R_3$ und Bestimmung der Richtung $R_4$

Im Beispiel der Abbildung 6.32 ergibt sich die endgültige Horizontalrichtung  $R_3$  zu:

$$R_3 = 400 - \beta \quad (6.33)$$

mit

$$\beta = \alpha + V_\alpha \quad (6.34)$$

und

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta y + \Delta\Omega_Y}{4 - \Delta l_{\Omega_X}}.$$

Die Horizontalrichtung zu  $R_4$  wird mit der Richtung  $R_3$  und dem doppelten Winkel  $\alpha_g$  berechnet (Abbildung 6.33). Für die Berechnung von  $\alpha_g$  wird die Strecke  $\Delta y$  und die Horizontalstrecke  $Sh_{MR}^3$  benötigt.  $Sh_{MR}^3$  berechnet sich nach dem Einmessen des Prismas 3 aus der Schrägstrecke  $Ss_{MR}^3$  und dem Höhenunterschied  $\Delta h_3$  (Formel 6.38).

$$R_4 = R_3 + 2\alpha_g \quad (6.35)$$

mit

$$\alpha_g = \arcsin \frac{\Delta Y}{Sh_{MR}^3} \quad (6.36)$$

wobei

$$Sh_{MR}^3 = \sqrt{Ss_{MR}^3{}^2 - \Delta h_3{}^2}.$$

### 6.10.5 Roboterlängsneigungen und Berechnung der Vertikalsuchwinkel $VS_{MR}^3$ und $VS_{MR}^4$

Die Abbildung 6.36 zeigt zwei Längsneigungsmöglichkeiten. Diese finden Berücksichtigung bei der Berechnung der Vertikalwinkel für die Suche der Prismen 3 und 4.

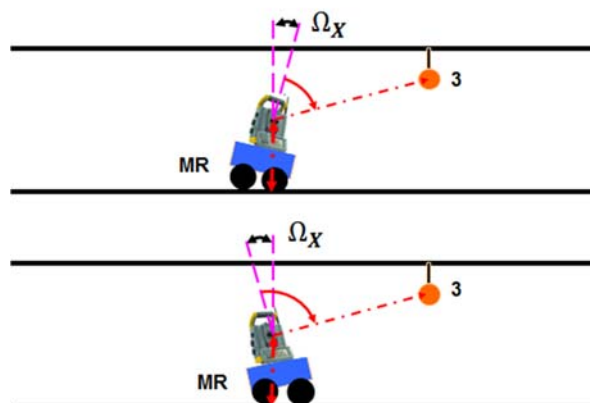
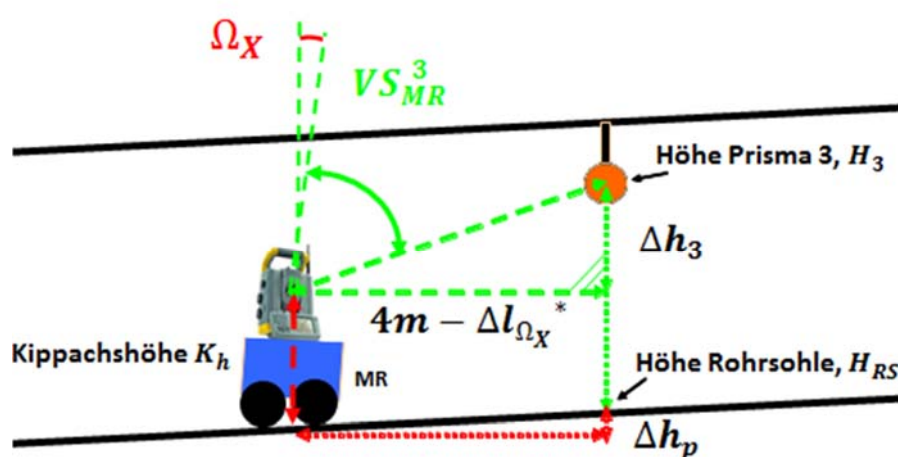


Abb. 6.36: Längsneigungsmöglichkeiten

Für die Suche der Prismen werden Vertikalwinkel benötigt. Hierbei muss unterschieden werden zwischen einem Vertikalwinkel, der sich in der Vermessung stets auf die lotrechte Stehachse des Tachymeters bezieht und einem Vertikalwinkel, der sich aus der Schrägstellung des Tachymeters ergibt. Bezeichnet werden diese Vertikalwinkel darum mit Vertikalsuchwinkel. Die Berechnungselemente (Abbildung 6.37) für den Vertikalsuchwinkel  $VS_{MR}^3$  des Prismas 3 (analog Prisma 4) ergeben sich aus der Roboterlängsneigung, gemessen durch den Nickwinkel  $\Omega_X$ , dem Höhenunterschied  $\Delta h_3$ , der Rohrsohlenhöhe  $H_{RS}$ , der Kippachshöhe  $K_h$  (nachfolgendes Kapitel), dem 4m-Abstand in Verbindung mit einer Lageänderung  $\Delta l_{\Omega_X}$  (Abbildung 6.42) und dem Höhenunterschied  $\Delta h_p$  aus dem Rohrsohlengefälle  $p$ .



\* siehe Abbildung 6.42

Abb. 6.37: Berechnungselemente für den Vertikalsuchwinkel zwischen Prisma 3 und Tachymeterzentrum

$$VS_{MR}^3 = 100gon - \left( \arctan \frac{\Delta h_3}{4 - \Delta l_{\Omega_X}} \right) - \Omega_X \quad (6.37)$$

mit

$$\Delta h_3 = (H_3 - H_{RS}) + \Delta h_p - K_h \quad (6.38)$$

und

$$\Delta h_p = \frac{p}{1000} * (4 - \Delta l_{\Omega_X}). \quad (6.39)$$

und der Lageänderung des Tachymeterzentrums durch Roboterlängsneigungen  $\Delta l_{\Omega_X}$  (Formel 6.50).

### 6.10.6 Kippachshöhenberechnung

Die Kippachshöhe  $K_h$  bezeichnet den vertikalen Abstand der Tachymeterkippachse  $KA$  zu einem Bodenpunkt. Im Messroboterverfahren ist der Bodenpunkt die Rohrsohle  $RS$ . Die Höhe  $S$  (Formel 6.42) setzt sich aus dem Abstand der Auflagefläche  $Alf$  der Räder bis zur Kippachse  $KA$ ,  $\Delta h_{Alf}^{KA}$  und dem Abstand von der Rohrsohle zur Auflagefläche  $\Delta h_{RS}^{Alf}$  zusammen (Abbildung 6.38). Zusätzlich kommen auf Grund von Schrägstellungen Höhenkorrekturen aus einer Querneigung  $\Delta h_{\Omega_Y}$  (Abbildung 6.40) und einer Längsneigung  $\Delta h_{\Omega_X}$  (Abbildung 6.41) hinzu und ergeben die Kippachshöhe  $K_h$ .

Der Abstand  $\Delta h_{Alf}^{KA}$  in der Abbildung 6.38 ist ein fester Wert bei einem gegebenen DN und wird einmalig z. B. mit einem Zollstock gemessen.

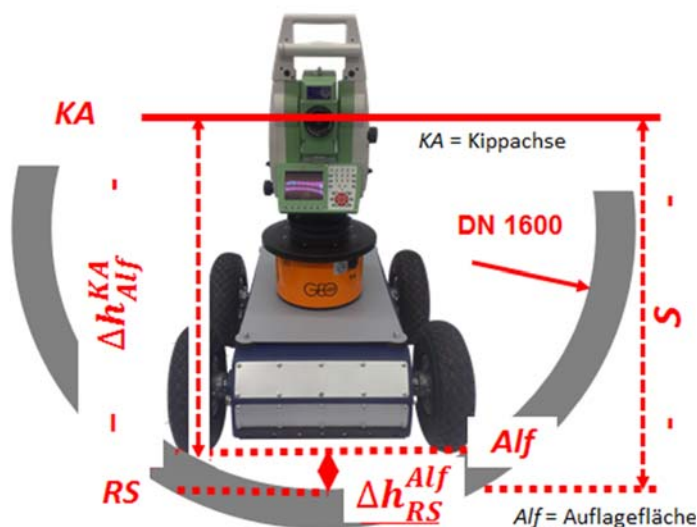


Abb. 6.38: Kippachshöhendefinition

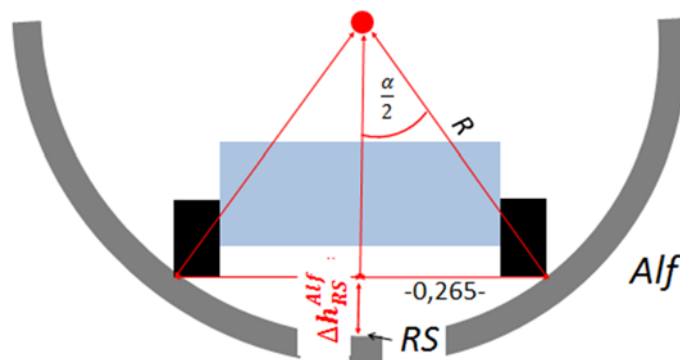


Abb. 6.39: Abstand Roboter über Rohrsohle

Der Höhenunterschied  $\Delta h_{RS}^{Alf}$  in Abbildung 6.39 wird für jeden Tunneldurchmesser einmalig berechnet. Je kleiner der Rohrdurchmesser, desto größer ist der Abstand der Auflagefläche zur Rohrsohle. Der Wert 26,5cm ist ein fester Wert, der sich aus dem halben Abstand der Radaußenkanten von 53cm ergibt.

$$\Delta h_{RS}^{Alf} = R - R * \cos \frac{\alpha}{2}, \quad (6.40)$$

wobei

$$\frac{\alpha}{2} = \arcsin \frac{0,265}{R}. \quad (6.41)$$

Damit ergibt sich  $S$  in Abbildung 6.38 zu:

$$S = \Delta h_{Alf}^{KA} + \Delta h_{RS}^{Alf} \quad (6.42)$$

Roboterquerneigungen ergeben Höhenkorrekturen  $\Delta h_{\Omega_Y}$  für die Berechnung der Kippachshöhe. Sie leiten sich aus dem Rollwinkel  $\Omega_Y$  (Abbildung 6.40) ab. Das Tachymeter verändert sich höhenmäßig in Bezug zur Rohrsohle, d. h. der Abstand der Kippachse zur Rohrsohle wird um den Betrag  $\Delta h_{\Omega_Y}$  größer.

$$\Delta h_{\Omega_Y} = (R - S) * (1 - \cos \Omega_Y) \quad (6.43)$$

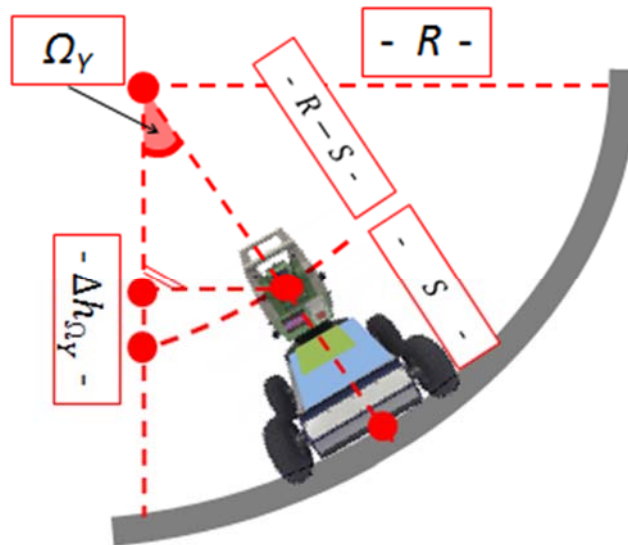


Abb. 6.40: Höhenkorrekturen auf Grund von Roboterquerneigungen

Aus den Roboterlängsneigungen durch den Nickwinkel  $\Omega_X$  (Abbildung 6.41) resultieren Höhenänderungen  $\Delta h_{\Omega_X}$ .

Hierfür werden folgende Werte benötigt:

$$\beta = \arctan \frac{\Delta h_{Alf}^{KA}}{b}, \quad (6.44) \quad \gamma = \beta + \Omega_X, \quad (6.45)$$

$$D_{Alf}^{KA} = \sin \gamma * S_{RUK}^{KA}, \quad (6.46) \quad \text{mit} \quad S_{RUK}^{KA} = \sqrt{\Delta h_{Alf}^{KA}^2 + b^2}. \quad (6.47)$$



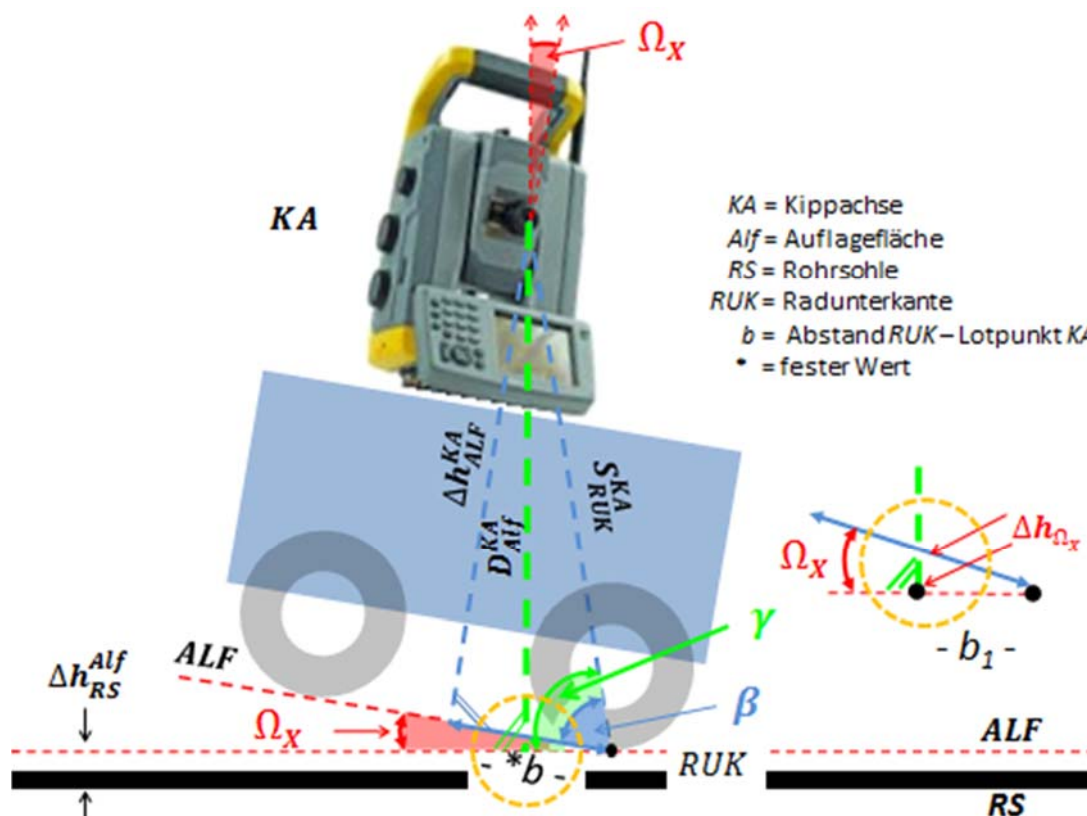


Abb. 6.41: Kippachshöhenberechnung bei Längsneigungen

Der Höhenunterschied  $\Delta h_{\Omega_X}$  berechnet sich zu:

$$\Delta h_{\Omega_X} = \tan \Omega_X * b_1 \quad (6.48)$$

mit

$$b_1 = \sqrt{S_{RUK}^{KA^2} - D_{Alf}^{KA^2}}.$$

Die Kippachshöhe  $K_h$  des Tachymeters ergibt sich damit insgesamt zu:

$$K_h = S + \Delta h_{\Omega_Y} + \Delta h_{\Omega_X} \quad (6.49)$$

mit  $S$  aus Formel (6.42).

### 6.10.7 Lageänderung des Tachymeterzentrums durch Roboterlängsneigungen

Roboterlängsneigungen führen zu einer lagemäßigen Veränderung des Tachymeterzentrums. Mit dem Nickwinkel  $\Omega_X$  und dem Höhenunterschied Auflagefläche zur Kippachse  $\Delta h_{Alf}^{KA}$  wird die Lageänderung  $\Delta l_{\Omega_X}$  (Abbildung 6.42) gegenüber einer lotrechten Stehachse berechnet.

Die Lageänderung findet Anwendung bei der Berechnung der Horizontalrichtungen (Abbildung 6.33) und der Vertikalsuchwinkel für die Prismen 3 und 4 (Abbildung 6.37).

$$\Delta l_{\Omega_X} = \frac{\Delta h_{Alf}^{KA} * \Omega_X}{\rho} \quad (6.50)$$

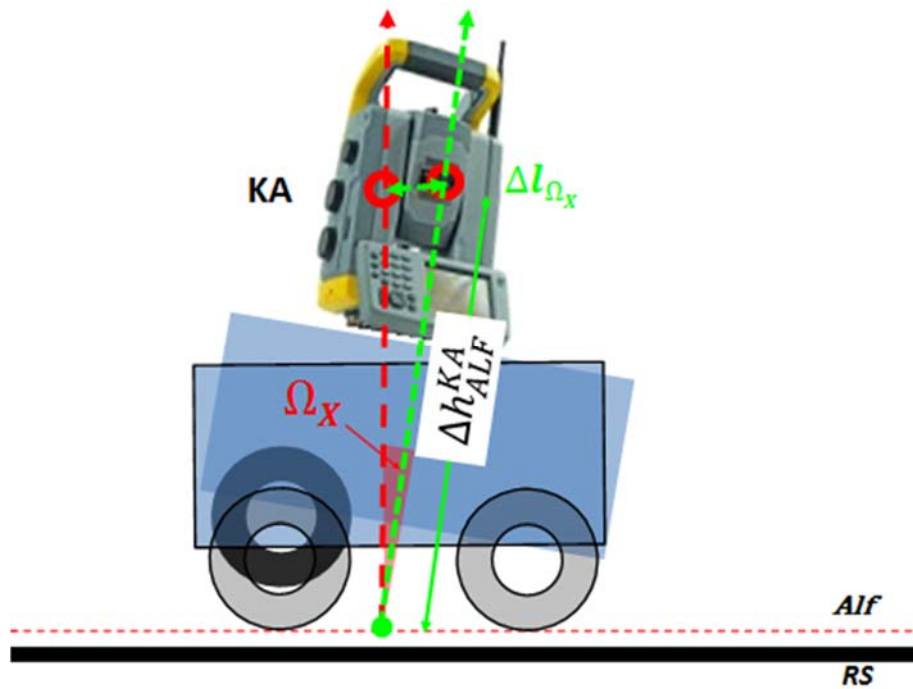


Abb. 6.42: Lageänderung des Tachymeterzentrums bedingt durch Roboterlängsneigungen

### 6.11 Koordinierung des Tachymeterstandpunktes

Mit Vorliegen der Horizontalrichtungen  $R_3$  und  $R_4$  gemäß Kapitel 6.10.4 und den Vertikal-suchwinkeln  $VS_{MR}^3$  und  $VS_{MR}^4$  gemäß Kapitel 6.10.5 können die Tachymeterstandpunktkoordinaten berechnet werden. Die Berechnung der Koordinaten (Abbildung 6.43) für die  $Y$ - und  $X$ - Koordinaten erfolgt mit den horizontalen Strecken  $Sh_{MR}^3$  und  $Sh_{MR}^4$  durch geodätische Rechenverfahren. Die Horizontalstrecken ergeben sich aus den Höhenunterschieden  $\Delta h_3$  und  $\Delta h_4$  zwischen den Messprismen und der Kippachse sowie den Schrägstrecken  $Ss_{MR}^3$  und  $Ss_{MR}^4$  mittels Pythagorasberechnung.

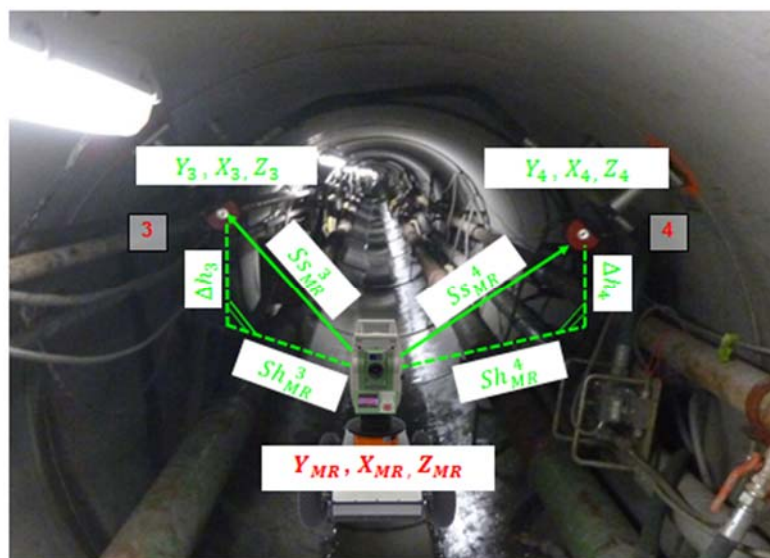


Abb. 6.43: Tachymeterstandpunktkoordinierung

Für die gesicherte Durchführung des autonomen Messverfahrens ist zu prüfen, ob der Messroboter an die richtige Stelle innerhalb des Tunnels gefahren ist. Hierfür ist ein Koordinatenvergleich zwischen dem Standpunkt aus der Koordinatenberechnung und der Vorabrechnung der Näherungskordinaten erforderlich (Kapitel 6.7.2).

Es liegen somit zwei Koordinatenpaare vor. Der mögliche Abstand der beiden Standpunkte soll eine vorgegebene Streckendifferenz zwischen diesen nicht überschreiten. Ein Toleranzwert von einem halben Meter wegen möglicher Unsicherheiten durch die Längen der Dehnerausfahrten ist einzuhalten. Wird die Toleranz nicht eingehalten, erfolgt ein Abbruch des Messvorgangs. Der Messroboter fährt die bis zu diesem Prismenring gefahrene Strecke zurück. Die zu fahrende Gesamtstrecke ergibt sich aus der Addition der einzelnen Teilstrecken zwischen den Messroboterstandpunkten MR in den jeweiligen Messpunktfeldern. Der Null- oder Startpunkt für die Fahrstreckenaddition ist definiert durch den ersten Tachymeterstandpunkt vor dem ersten Prismenring nach dem Messvorgang für die Hodometerkalibrierung. Somit hält der Messroboter nach der Rückfahrt wieder am ersten Standpunkt an. Der Wendepunkt für eine Rückfahrt ist im Regelfall der Tachymeterstandpunkt vor dem letzten Prismenring im Bereich der Vortriebsmaschine. Jede Rückfahrtstrecke wird auf Grund der Hodometergenauigkeiten (Kapitel 6.12.2) generell aus Sicherheitsgründen um 10m reduziert.

## 6.12 Genauigkeitsabschätzungen der Sensoren mit Berücksichtigung im Messablauf

### 6.12.1 Roboterquerstellungen und deren Berücksichtigung im Messablauf

Die im Kapitel 6.10.2 beschriebenen Roboterquerstellungen werden durch die Strecken der Laserscanner erfasst. Dadurch kann der Querstellungswinkel  $V_\alpha$  (Abbildungen 6.34 und 6.44) berechnet werden. Laut Datenblatt HOKUYO (2017) liegt der Streckenfehler  $f_s$  bei  $\pm 10\text{mm}$  bei einer Lasermessstrecke von bis zu 1m. Ist die Strecke  $S_2$  z. B. mit einem Fehler  $f_s = +10\text{mm}$  und die Strecke  $S_4$  mit  $f_s = -10\text{mm}$  gemessen, berechnet sich ein Maximalfehler  $fV_\alpha$  in Abhängigkeit des Laserabstands  $LA$  zu:

$$fV_\alpha = \arctan \frac{2 \cdot |f_s|}{LA} \quad (6.51)$$

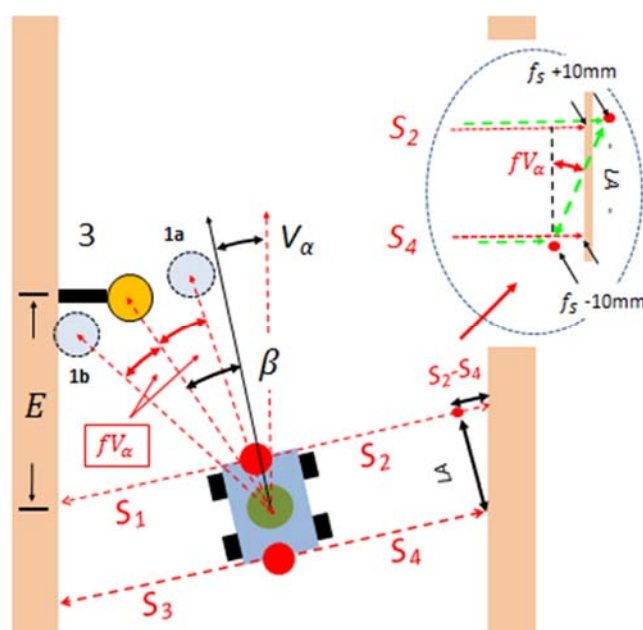


Abb. 6.44: Linksseitige Roboterquerstellung mit Auswirkungen auf Prismenfindung durch Laserscannergenauigkeiten

Ein Maximalfehler  $fV_\alpha$  bei einem Laserabstand  $LA$  z. B. von 0,60m berechnet sich damit zu:

$$fV_\alpha = \arctan \frac{2 * |0,01|}{0,60} = 2,12gon.$$

Mit dem Abstand  $E$  von 4,0m zwischen Tachymeter und Prismenring ergibt sich ein Querfehler  $Q_f$  nach:

$$Q_f = \frac{E * fV_\alpha}{\rho} \quad (6.52)$$

mit

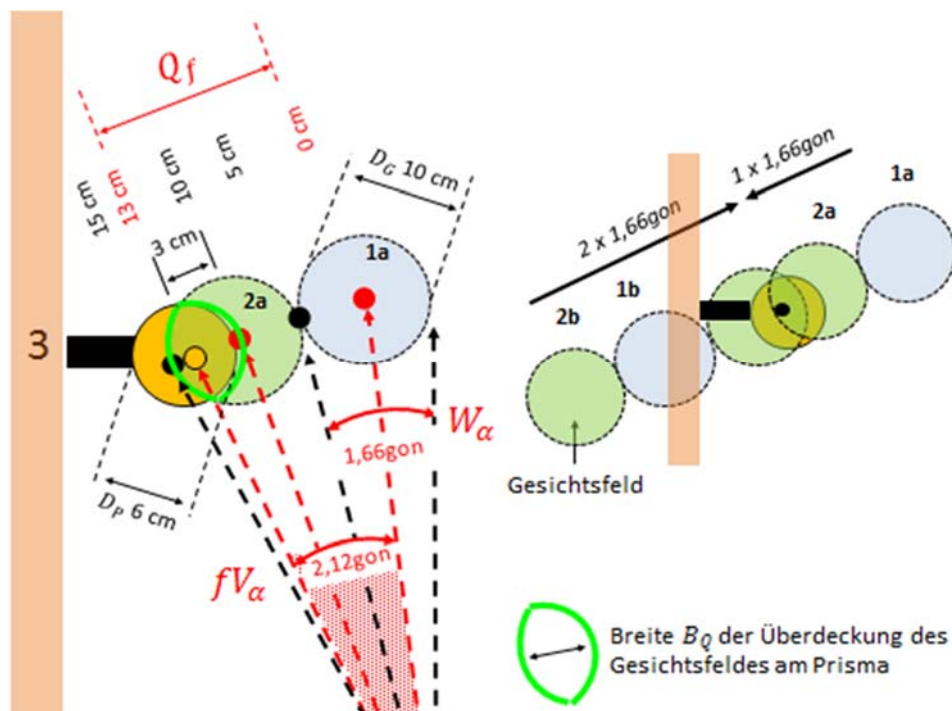
$$\rho = \frac{200}{\pi}$$

zu

$$Q_f = \frac{4,0 * 2,12}{\rho} = 13cm.$$

Durch mögliche Schrägstellungen des Messroboters können die Lasermessstrecken größer als 1m werden (Abbildung 6.14). Dann berechnet sich der Streckenfehler  $f_s$  bei einer Messstrecke von z. B. 1,10m zu 11mm (1% der Messstrecke). Der Querfehler  $Q_f$  ergibt sich dann nach Formel 6.52 zu 14cm. Je kleiner die Tunneldurchmesser werden, desto geringer sind Schrägstellungen wegen der größeren Rohrkrümmung möglich, im Gegensatz zu Roboterquerneigungen.

Berücksichtigung findet der Maximalfehler  $fV_\alpha$  und damit auch der Querfehler  $Q_f$  durch einen entsprechenden Messablauf für die Suche des Prismas 3.



6.45: Auswirkungen bei der Prismsuche durch Lasermessstreckengenauigkeiten

Der Querfehler  $Q_f$  bewirkt, dass das Gesichtsfeld des Tachymeters entweder eine Position 1a oder 1b einnimmt. Jedes Mal wird kein Prisma gefunden.

Die Größe des Gesichtsfeldes berechnet sich mit dem Gesichtsfeldwinkel  $W_\alpha$  und der Entfernung  $E$  des Tachymeters. Bei dem Tachymeter Leica TS15 beträgt der Gesichtsfeldwinkel 1,66gon (LEICA 2010).

$$D_G = \frac{E * W_\alpha}{\rho} \quad (6.53)$$

Damit ergibt sich  $D_G$  mit  $E = 4m$  zu:

$$D_G = \frac{4,0 \cdot 1,66}{\rho} = 10 \text{ cm}.$$

Das Tachymeter wird um den Gesichtsfeldwinkel  $W_\alpha$  ( $1 \times 1,66\text{gon}$ ) nach links verdreht. In der Position 2a befindet sich das Prisma 3 im Gesichtsfeld des Tachymeters und wird automatisch in das Prismenzentrum geführt. Erscheint in der Position kein Prisma, befindet sich das Gesichtsfeld in der Position 2b. Das Tachymeter wird um den zweifachen Gesichtsfeldwinkel ( $2 \times 1,66\text{gon}$ ) nach rechts gedreht. Das Gesichtsfeld erfasst das Prisma 3 und wird eingemessen. Jedes Mal wird das Prisma zumindest teilweise vom Gesichtsfeld überdeckt. Die Überdeckung des Gesichtsfeldes durch Querstellungen ergibt eine Breite  $B_Q$ , die sich durch die Hodometer- und Rollwinkelfehler zu einer Breite  $B_{HR}$  verändert (Tabelle 6.9).

Die Breite  $B_Q$  der Überdeckung des Gesichtsfeldes am Prisma 3 berechnet sich aus dem Gesichtsfelddurchmesser der Position 2a mit 10cm und dem halben Durchmesser  $D_G$  des Gesichtsfeldes der Position 1a mit 5cm abzüglich der Differenz aus dem Querfehler  $Q_f$  von 13cm und dem halben Prismendurchmesser  $D_p$  mit 3cm, was zu einer Überdeckungsbreite  $B_Q$  von 5cm führt.

$$B_Q = D_{G_{2a}} + \frac{D_{G_{1a}}}{2} - \left( Q_f - \frac{D_p}{2} \right) \quad (6.54)$$

$$B_Q = 10 + 5 - (13 - 3) = 5 \text{ cm}.$$

Ein Querfehler  $Q_f$  von 14cm wegen eines Streckenfehlers  $f_s$  von oben genannten 11mm führt dazu, dass die Breite der Überdeckung des Gesichtsfeldes 4cm groß ist.

### 6.12.2 Hodometergenauigkeiten und deren Berücksichtigung im Messablauf

Beim Hodometer MAB36 SER werden die Messabweichungen als Toleranzwert  $T$  mit  $\pm 0,2\%$  der gefahrenen Strecke als größter Fehler angegeben (Tabelle 6.2). Bei einer Fahrstrecke von 40m von einem Messpunktfeld in das nächste führt die Abweichung damit zu einer Fehlergröße von 8cm. Das bedeutet, dass der Roboter innerhalb eines Bereiches von 39,92m und 40,08m zum Stehen kommen kann bzw. dass sich die 4m-Strecke vor einem Prismenring um diese 8cm verändert. Der Winkel  $\alpha_1$  verändert seine Größe um  $\Delta\alpha$  (Abbildung 6.46). Daraus resultiert eine Lageabweichung  $f\Delta y$ .

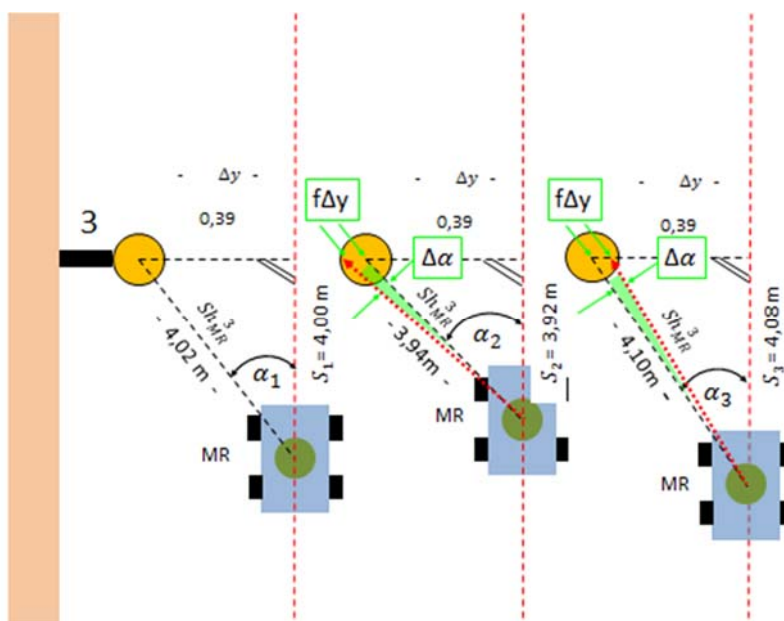


Abb. 6.46: Lageabweichungen bei der Prismensuche durch Hodometerungenauigkeiten, DN1600



Die Lageabweichungen  $f\Delta y$  (Tabelle 6.7) ergeben sich zu:

$$f_{\Delta y} = \frac{Sh_{MR}^3 \Delta \alpha}{\rho} \quad (6.55)$$

mit

$$Sh_{MR}^3 = \sqrt{\Delta y^2 + S^2}$$

und

$$\Delta \alpha_2 = \alpha_2 - \alpha_1 \quad \text{und} \quad \Delta \alpha_3 = \alpha_3 - \alpha_1.$$

DN		m		m		gon		gon		m		cm
1600	$S_1$	4,00	$\Delta y$	0,39	$\alpha_1$	6,19			$Sh_{MR}^3$	4,02		
	$S_2$	3,92			$\alpha_2$	6,31	$\Delta \alpha_2$	-0,12		3,94	$f\Delta y$	-0,7
	$S_3$	4,08			$\alpha_3$	6,07	$\Delta \alpha_3$	0,12		4,10		0,7
2800	$S_1$	4,00	$\Delta y$	0,81	$\alpha_1$	12,72			$Sh_{MR}^3$	4,08		
	$S_2$	3,92			$\alpha_2$	12,97	$\Delta \alpha_2$	-0,25		4,00	$f\Delta y$	-1,6
	$S_3$	4,08			$\alpha_3$	12,47	$\Delta \alpha_3$	0,25		4,16		1,6

Tabelle 6.7: Berechnung der Lageabweichungen  $f\Delta y$

Der Toleranzwert  $T$  von 0,2% bewirkt, dass der Roboter nach einer Rückwärtsfahrt aus dem Bereich der Vortriebsmaschine z. B. bei einer Haltungsänge von 1200m mit einem Streckenfehler von  $\pm 2,4$ m zum Stehen kommen kann. Aus Sicherheitsgründen wird die Fahrstrecke um 10m reduziert. Damit ist gewährleistet, dass der Roboter auch im Tunnelrohr zum Stehen kommt und nicht in den Pressschacht einfährt.

Die Lageabweichungen  $f\Delta y$  haben einen Einfluss auf die Berechnung der Breite der Gesichtsfeldüberdeckung und müssen im Messablauf berücksichtigt werden.

Eine positive Lageabweichung  $f\Delta y$  führt zu einer größeren Überdeckung des Gesichtsfeldes und begünstigt damit den Messablauf für die Prismenfindung. Bei negativen Lageabweichungen verringert sich die Breite der Gesichtsfeldüberdeckung. Die verschiedenen Möglichkeiten sind in der Tabelle 6.9 zusammengestellt.

### 6.12.3 Rollwinkelgenauigkeiten und deren Berücksichtigung im Messablauf

Der statische Rollwinkel (Messsystem *Orientus*) wird mit einer Genauigkeit von  $f_{\Omega_Y} = \pm 0,2^\circ = \pm 0,22$ gon angegeben. Die Größe des Fehlers für das Tachymeterzentrum ist abhängig von dem Wert  $(R - S)$ .  $S$  ist bekannt, der Radius variabel. Der Lageabweichfehler  $\Delta f_{\Omega_Y}$  der Lageabweichung  $\Delta \Omega_Y$  berechnet sich zu:

$$\Delta f_{\Omega_Y} = \frac{(R-S) \cdot f_{\Omega_Y}}{\rho} \quad (6.56)$$

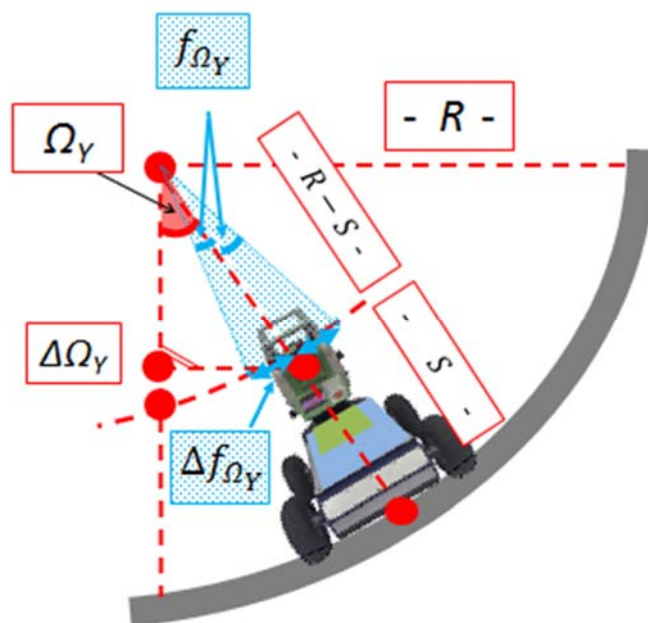


Abb. 6.47: Lageabweichfehler durch Rollwinkelgenauigkeiten

$DN$ $mm$	$R$ $m$	$S$ $m$	$R - S$ $m$	$f_{\Omega_Y}$ $gon$	$\Delta f_{\Omega_Y}$ $mm$
				$\pm$	$\pm$
1600	0,8	0,5	0,3	0,22	1
2800	1,4	0,5	0,9	0,22	3

Tabelle 6.8: Berechnung der Lageabweichfehler für Rollwinkelgenauigkeiten

Der Lageabweichfehler  $\Delta f_{\Omega_Y}$  hat auf die Suche des Prismas 3 auf Grund der geringen Größe nur einen kleinen Einfluss auf den Messvorgang. Für den Durchmesser DN1600 beträgt  $\Delta f_{\Omega_Y}$  nur 1mm und bei einem DN2800 3mm (Tabelle 6.9).

#### 6.12.4 Nickwinkelgenauigkeiten und deren Berücksichtigung im Messablauf

Der statische Nickwinkel (Messsystem *Orientus*) wird wie der Rollwinkel mit einer Genauigkeit von  $f_{\Omega_X} = \pm 0,2^\circ = \pm 0,22gon$  angegeben. Bezogen auf den Abstand  $E$  des Tachymeters zum Prisma mit 4m ergibt sich der Höhenabweichfehler  $\Delta f_{\Omega_X}$  am Prisma in der Abbildung 6.48 zu:

$$\Delta f_{\Omega_X} = \frac{E \cdot f_{\Omega_X}}{\rho} \quad (6.57)$$

$$\Delta f_{\Omega_X} = \frac{4 \cdot 0,22}{\rho} = 14mm.$$

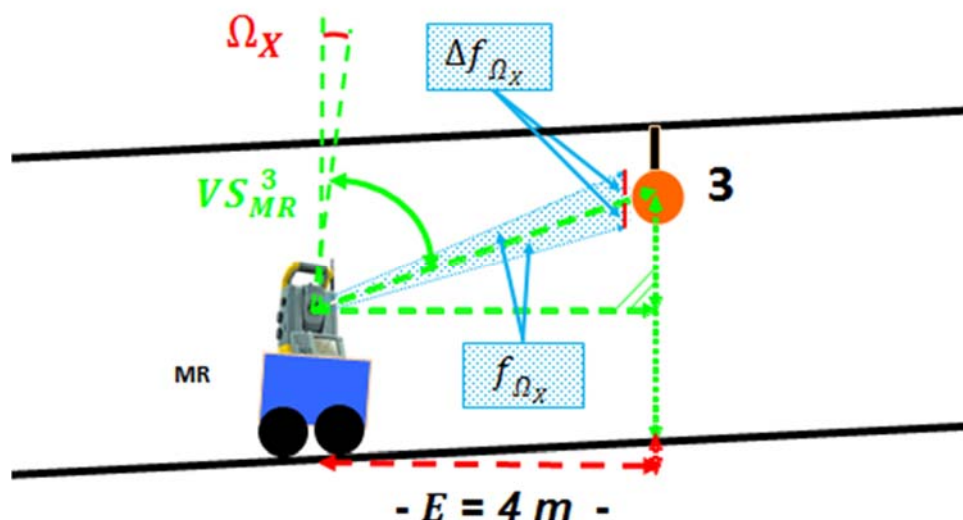


Abb. 6.48: Höhenabweichfehler durch Nickwinkelgenauigkeiten

Bei dem Tachymeter Leica TS15 beträgt der Gesichtsfeldwinkel wie oben aufgeführt 1,66gon, was einem Gesichtsfelddurchmesser am Prisma 3 von 10cm entspricht (Formel 6.53). Der Höhenabweichfehler  $\Delta f_{\Omega_X}$  von  $\pm 14\text{mm}$  bewirkt, dass das Gesichtsfeld eine um diesen Betrag nach oben bzw. nach unten verschobene Position einnehmen kann. Das Prisma selbst bleibt mit seinem Durchmesser von 6cm trotzdem vollständig erfasst. Der Höhenabweichfehler braucht deswegen nicht im Messablauf berücksichtigt werden.

### 6.12.5 Genauigkeitsabschätzungen der Höhenkorrekturen $\Delta h_{\Omega_Y}$ und $\Delta h_{\Omega_X}$ sowie der Lageänderungen $\Delta l_{\Omega_X}$ und deren Berücksichtigung im Messablauf

Die Größen der Höhenkorrekturen  $\Delta h_{\Omega_Y}$  (Abbildung 6.40) und  $\Delta h_{\Omega_X}$  (Abbildung 6.41) für die Berechnung der Kippachshöhe sind abhängig von den jeweiligen Roboterquer- und Längsneigungen. Im Normalfall steht der Roboter annähernd mittig im Rohr. Dann sind die Höhenkorrekturen auf Grund von Roboterquerneigungen gering. Das gilt auch für die Höhenkorrekturen durch die Roboterlängsneigungen. Eine Längsneigung resultiert folglich nur durch das Rohrgefälle. Neigungsbeträge in einer Größenordnung von z. B. 20cm sind nicht zu erwarten.

$$f_{\Delta h_{\Omega_Y}} = f_{\Delta h_{\Omega_X}} = \frac{0,2 \cdot 0,22}{\rho} = 0,7\text{mm}$$

Die Größen der Lageänderungen des Tachymeterzentrums durch Roboterlängsneigungen  $\Delta l_{\Omega_X}$  berechnen sich mit dem Höhenunterschied  $\Delta h_{ALF}^{KA}$  von 0,5m und dem Nickwinkel von 0,22gon.

$$f_{\Delta l_{\Omega_X}} = \frac{0,5 \cdot 0,22}{\rho} = 1,7\text{mm}$$

Die Fehler  $f_{\Delta h_{\Omega_Y}}$ ,  $f_{\Delta h_{\Omega_X}}$  und  $f_{\Delta l_{\Omega_X}}$  können wegen ihrer geringen Größe unbeachtet bleiben und haben auf die Berechnungen der Horizontalrichtungen (6.10.4) und der Vertikalsuchwinkel (6.10.5) keinen Einfluss.

### 6.12.6 Die Genauigkeitsabschätzungen in der Zusammenfassung

Das Prisma 3 wird in der oben beschriebenen Vorgehensweise mit Hilfe der Gesichtsfelder gefunden und überdeckt mindestens einen Teil des Prismas. Die Breite  $B_Q$ , die aus der Roboterquerstellung resultiert, ergibt wie oben erwähnt durch die Hodometer- und Rollwinkelfehler eine Breite  $B_{HR}$ . Die übrigen Fehler brauchen auf Grund der geringen Größe nicht im Messablauf berücksichtigt werden.

Die Breite der Überdeckung des Gesichtsfeldes  $B_{HR}$  wird in der Tabelle 6.9 für die Rohrdurchmesser DN1600 und DN2800 aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass auch im ungünstigsten Fall immer noch eine Prismenüberdeckung gegeben ist. Ungünstig bedeutet hier, wenn sich die Fehler einseitig aufsummieren. Bei einem DN2800 ist die Überdeckungsbreite immer noch 2,1cm groß bei den oben aufgeführten Annahmen hinsichtlich der Lasermessstreckengenauigkeiten (Kapitel 6.12.1). Das reicht aus, um das Prisma zu finden. Das Tachymeter wird automatisch in das Prismenzentrum geführt.

$Q_f$	$B_Q$	$f\Delta y$		$\Delta f_{\Omega y}$		$B_{HR} = B_Q + f\Delta y + \Delta f_{\Omega y}$	
DN		1600	2800	1600	2800	1600	2800
cm							
13	5	-0,7	-1,6	-0,1	-0,3	4,2	3,1
		0,7	1,6	0,1	0,3	5,8	6,9
14	4	-0,7	-1,6	-0,1	-0,3	3,2	2,1
		0,7	1,6	0,1	0,3	4,8	5,9

Tabelle 6.9: Berechnung von Gesichtsfeldüberdeckungen

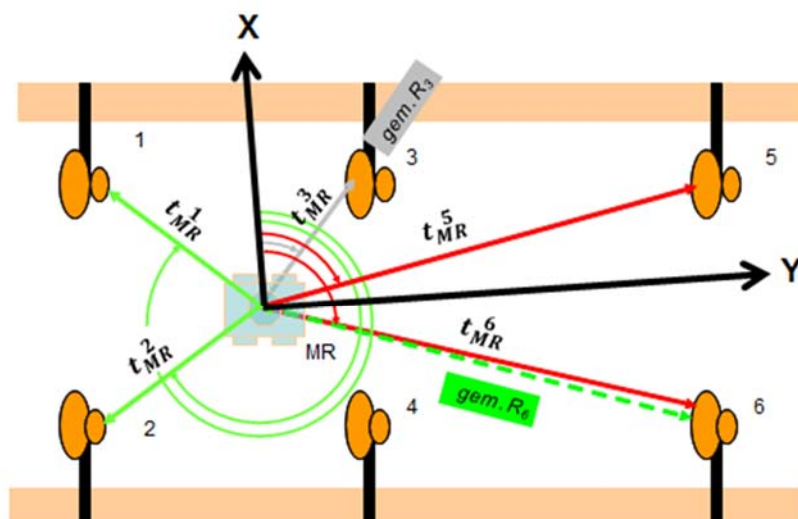
### 6.13 Berechnung der Horizontalrichtungen für die Suche der Prismen 1,2,5 und 6

Nachdem die Tachymeterstandpunktkoordinaten vorliegen (Kapitel 6.11), können die Horizontalrichtungen für die Suche der Prismen 1 und 2 im rückwärtigen Tunnelbereich sowie für die Prismen 5 und 6 im vorderen Tunnelbereich berechnet werden. Hierfür sind die Horizontalwinkel vom Tachymeterstandpunkt zu den Prismen zu bestimmen. Die Horizontalwinkelberechnung benötigt die Richtungswinkel:

$$\begin{aligned}
 t_{MR}^3 &= \arctan \frac{Y_3 - Y_{MR}}{X_3 - X_{MR}} & t_{MR}^6 &= \arctan \frac{Y_6 - Y_{MR}}{X_6 - X_{MR}} & t_{MR}^5 &= \arctan \frac{Y_5 - Y_{MR}}{X_5 - X_{MR}} \\
 t_{MR}^1 &= \arctan \frac{Y_1 - Y_{MR}}{X_1 - X_{MR}} & t_{MR}^2 &= \arctan \frac{Y_2 - Y_{MR}}{X_2 - X_{MR}}
 \end{aligned} \quad (6.58)$$

Die Horizontalrichtung  $R_6$  zu Prisma 6 errechnet sich nach Abbildung 6.49 aus der Differenz der Richtungswinkel  $t_{MR}^6 - t_{MR}^3$  und der gemessenen Richtung  $R_3$  zum Prisma 3 zu:

$$R_6 = R_3 + (t_{MR}^6 - t_{MR}^3) \quad (6.59)$$



6.49: Horizontalrichtungsbezug durch Prisma 6

Die Richtung  $R_3$  wird nur für die Absteckungsberechnung für das Prisma 6 in Ansatz gebracht. In den Abbildungen 6.50 und 6.51 wird dargestellt, wie für eine gesicherte Anzielung der Prismen in einem autonomen Messverfahren ein Messvorgang vorzusehen ist, der ausschließt, dass bei den Tachymeterdrehungen unerwünschte Prismen erfasst werden. Bei geringen Tunneldurchmessern deckt das Gesichtsfeld des Tachymeters mit den schon erwähnten 1,66gon den teilweisen oder gesamten Tunnelquerschnitt mit allen Prismen ab. In kleindimensionierten Tunnelrohren liegen die Doppelpismen auf jeder Tunnelrohrseite optisch dicht nebeneinander und sind für eine mannlose Vermessung gegebenenfalls schwierig auseinanderzuhalten. Bei einer herkömmlich durchzuführenden Kontrollvermessung kann der Instrumentenbediener die gewünschten Prismen manuell anzielen. Am Prisma 6 beträgt der Durchmesser des Gesichtsfeldes  $D_G$  nach Formel 6.53 1,15m bei der Entfernung  $E$  von 44m zwischen dem Tachymeter und dem Prisma.

Die berechnete Richtung  $R_6$  wird im autonomen Verfahren rechnerisch so verändert, dass das Gesichtsfeld nur das Prisma 6 erfasst und nicht das Prisma 8 des folgenden Prismenrings. Hierfür wird  $R_6$  um den halben Gesichtsfeldwinkel (0,83gon) vergrößert und durch einen Winkel reduziert, der sich aus dem halben Prismendurchmesser von 3cm und einer Strecke von 10cm errechnet, die sich in etwa aus der Hälfte des räumlichen Abstands von 17cm zwischen den Prismen 6 und 8 ergibt. Damit wird das Gesichtsfeld des Prismas 6 vollständig erfasst, ohne dass das nächste Prisma 8 berührt wird. Erscheint das Prisma 6 nicht im Gesichtsfeld, werden die vorgenannten Winkeländerungen zurückgenommen. Die Horizontalrichtung für die Prismensuche  $H_zPS_6$  errechnet sich zu:

$$H_zPS_6 = R_6 + 0,83 - \frac{0,13 \cdot \rho}{S_{MR}^6} \quad (6.60)$$

Nach dem Finden des Prismas 6 wird die tatsächliche Horizontalrichtung  $R_6$  gemessen. Auf diese  $R_{6,gem}$  werden die Richtungswinkeldifferenzen zwischen den übrigen Prismen bezogen. Die abzusteckenden Horizontalrichtungen  $R$  zu den Prismen 5, 1 und 2 ergeben sich nach Abbildung 6.49 zu:

$$\begin{aligned} R_5 &= R_{6,gem.} + (t_{MR}^5 - t_{MR}^6) \\ R_1 &= R_{6,gem.} + (t_{MR}^1 - t_{MR}^6) \\ R_2 &= R_{6,gem.} + (t_{MR}^2 - t_{MR}^6) \end{aligned} \quad (6.61)$$



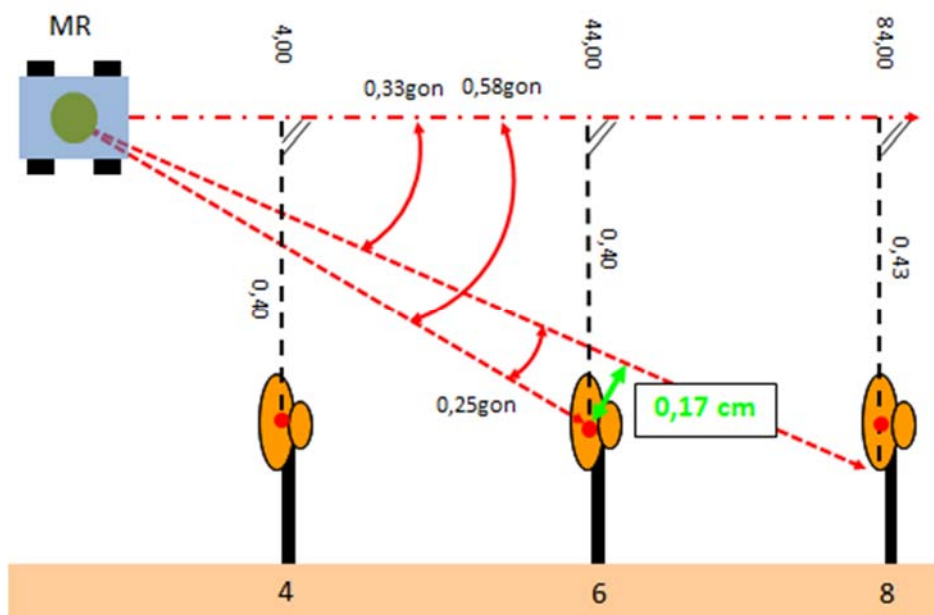


Abb. 6.50: Begrenzung Tachymetergesichtsfeld bei Prismensuche 6, DN1600

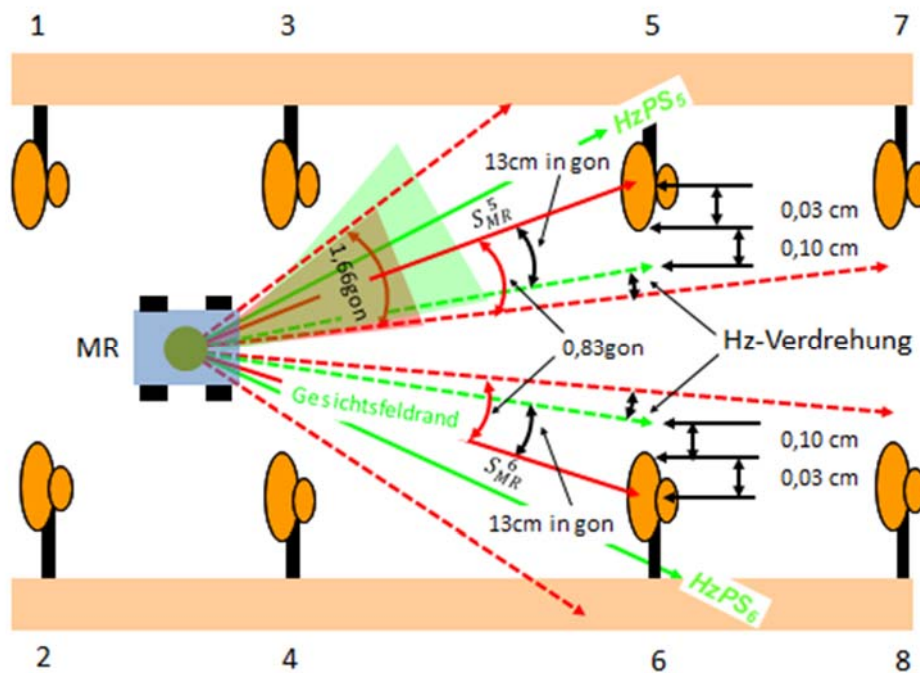


Abb. 6.51: Prismensuche mit angepasstem Tachymetergesichtsfeld, Prismen 5 und 6

Die Horizontalrichtungen für die Prismensuche  $H_zPS$  für Prismen 5, 1 und 2 ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}
 H_zPS_5 &= R_5 - 0,83 + \frac{0,13 \cdot \rho}{S_{MR}^5} \\
 H_zPS_1 &= R_1 + 0,83 - \frac{0,13 \cdot \rho}{S_{MR}^1} \\
 H_zPS_2 &= R_2 - 0,83 + \frac{0,13 \cdot \rho}{S_{MR}^2}
 \end{aligned}
 \tag{6.62}$$

### 6.14 Berechnung der Vertikalwinkel für die Suche der Prismen 1,2,5 und 6

Für die Suche der Prismen 1,2,5 und 6 werden wiederum Vertikalwinkel benötigt. Wie im Kapitel 6.10.5 schon erläutert, muss zwischen einem Vertikalwinkel, der sich in der Vermessung auf die lotrechte Stehachse des Tachymeters bezieht und einem Vertikalwinkel, der sich aus einer Schrägstellung des Tachymeters ergibt, unterschieden werden. Zwischen beiden Stellungen ergibt sich eine Winkeldifferenz, die bei der Suche des Prismas 3 durch den Nickwinkel  $\Omega_X$  erfasst wird. Zum Zeitpunkt der ersten Prismensuche sind die Sensordaten die einzig zur Verfügung stehenden Messwerte. Die Suche der Prismen 1,2,5 und 6 erfolgt mit tachymetrisch gemessenen Vertikalwinkeln. Die Tachymetergenauigkeiten (Kapitel 7) sind besser als die Genauigkeiten der aufgeführten Sensoren.

Die Winkeldifferenzen sind als Verbesserungen an die zu berechnenden Vertikalwinkel für die Prismensuche anzubringen. Bedingt durch Querneigungen des Tachymeters sind weitere Korrekturen in Form von Querneigungswerten notwendig.

Der auf die lotrechte Stehachse üblich bezogene Vertikalwinkel wird im Folgenden mit Vertikalsollwinkel und der Vertikalwinkel des geneigten Tachymeters als Vertikalistwinkel bezeichnet.

Für die Berechnung der Korrekturwerte werden zuerst die Vertikalsollwinkel zwischen dem Tachymeterstandpunkt und den Prismen 3 und 4 errechnet (Abbildung 6.52).

$$V_{MR}^3 \text{ Soll} = \arccos \frac{\Delta h_3}{SS_3}$$

$$V_{MR}^4 \text{ Soll} = \arccos \frac{\Delta h_4}{SS_4}$$
(6.63)

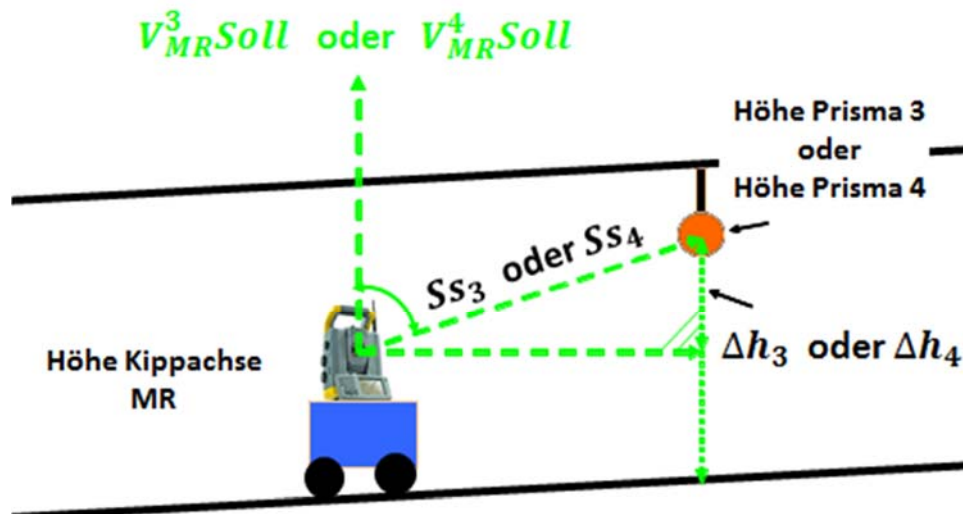


Abb. 6.52: Berechnung der Vertikalsollwinkel mit den Prismen 3 und 4

#### 6.14.1 Berechnung von Vertikalwinkelverbesserungen

In der Abbildung 6.53 sind die Längsneigungen für das Prisma 3 durch Vertikalwinkelverbesserungen  $V_v$  dargestellt. Die Abbildung zeigt zwei Möglichkeiten der Tachymeterlängsneigungen. Aus der Differenz des berechneten Vertikalsollwinkels  $V_{MR}^3 \text{ Soll}$  und des gemessenen Vertikalistwinkels  $V_{MR}^3 \text{ Ist}$  ergibt sich eine Vertikalwinkelverbesserung  $V_{v_3}$  für das Prisma 3. Gleiches gilt für das Prisma 4. Beide Einzelverbesserungen werden durch Mittelung zur Längsneigung  $V_v$  zusammengefasst.

$$Vv_3 = V_{MR}^3 Soll - V_{MR}^3 Ist, \quad Vv_4 = V_{MR}^4 Soll - V_{MR}^4 Ist, \quad (6.64)$$

$$Vv = (Vv_3 + Vv_4) * \frac{1}{2}.$$

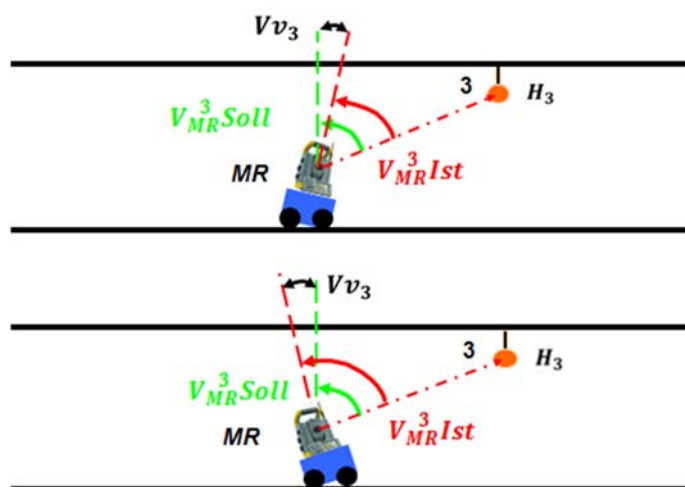


Abb. 6.53: Differenz zwischen Vertikalsoll- und Vertikalistwinkel für Prisma 3

### 6.14.2 Berechnung von Querneigungswerten

Ein Querneigungswert  $QN$  errechnet sich aus den Vertikalwinkelverbesserungen der Prismen 3 und 4 zu:

$$QN = (Vv_3 - Vv_4) * \frac{1}{2} \quad (6.65)$$

Nachfolgend werden verschiedene Neigungspositionen dargestellt.

Die Abbildung 6.54 zeigt eine Tachymeterposition, in der das Tachymeter senkrecht und horizontal vor den Prismen 3 und 4 im Tunnel steht. Somit haben der Rollwinkel  $\Omega_Y$  und der Nickwinkel  $\Omega_X$  den Wert Null. Die Vertikalsollwinkel haben den gleichen Winkelwert wie die gemessenen Vertikalistwinkel.

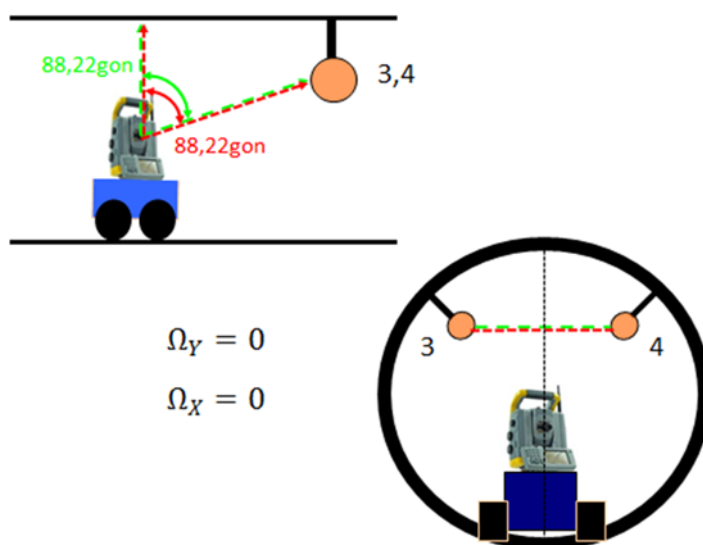


Abb. 6.54: Beispiel einer Tachymeterposition ohne Längs- und ohne Querneigung

Nach den Formeln 6.64 und 6.65 ergeben sich  $Vv$  und  $QN$  zu:

$$Vv_3 = 88,22gon - 88,22gon = 0,00 gon$$

$$Vv_4 = 88,22gon - 88,22gon = 0,00 gon$$

$$Vv = (0,00gon + 0,00gon) * \frac{1}{2} = 0,00 gon$$

$$QN = (0,00gon - 0,00gon) * \frac{1}{2} = 0,00 gon$$

In der Abbildung 6.55 wird eine Situation gezeigt, in der das Tachymeter in einer Längsneigung steht. Eine Querneigung liegt nicht vor.

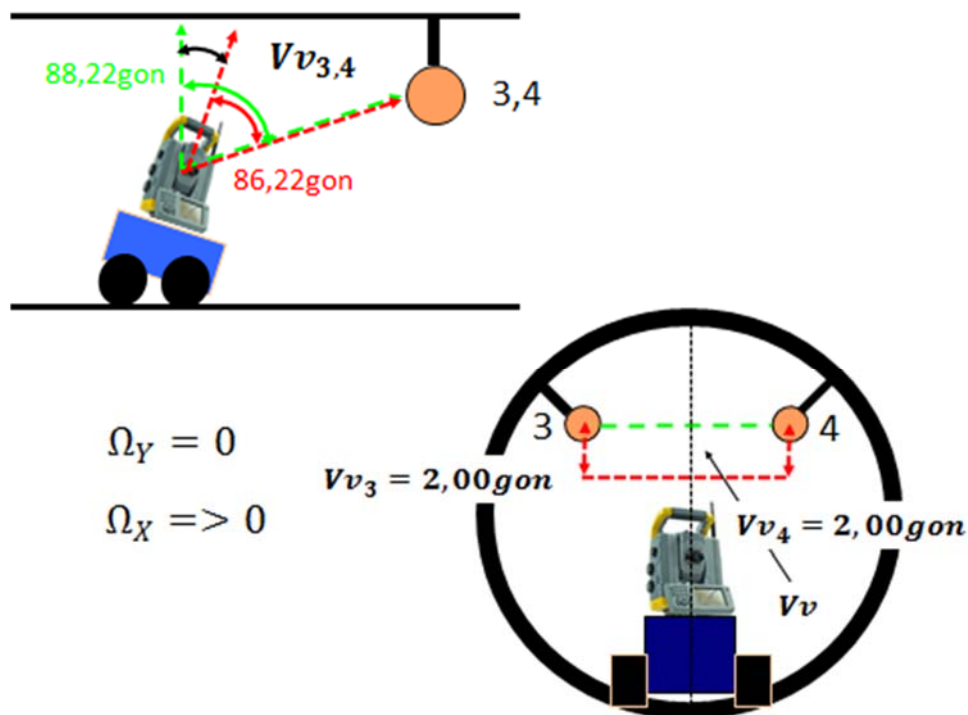


Abb. 6.55: Beispiel einer Tachymeterposition in Längsneigung und ohne Querneigung

$$Vv_3 = 88,22gon - 86,22gon = 2,00 gon$$

$$Vv_4 = 88,22gon - 86,22gon = 2,00 gon$$

$$Vv = (2,00gon + 2,00gon) * \frac{1}{2} = 2,00 gon$$

$$QN = (2,00gon - 2,00gon) * \frac{1}{2} = 0,00 gon$$

Eine Tachymeterposition ohne Längsneigung und in einer in Tunnelrichtung rechtsseitigen Querstellung des Roboters zeigt die nachfolgende Abbildung 6.56. Die Längs- und Querneigung ergibt sich in diesem Beispiel zu:

$$Vv_3 = 88,22gon - 86,22gon = 2,00gon \quad Vv_4 = 88,22gon - 90,22gon = -2,00gon$$

$$Vv = (2,00gon + (-2,00)gon) * \frac{1}{2} = 0,00 gon$$

$$QN = (2,00gon - (-2,00)gon) * \frac{1}{2} = 2,00 gon$$

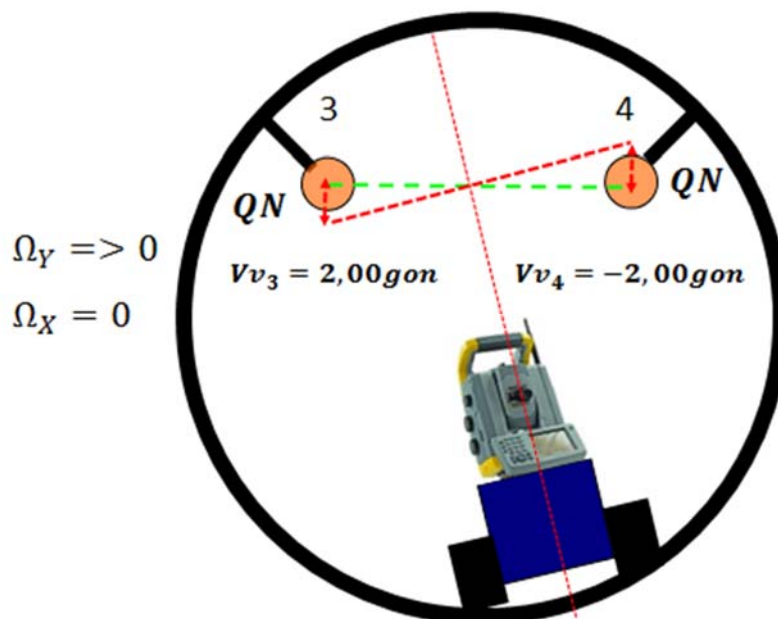


Abb. 6.56: Beispiel einer Tachymeterposition ohne Längsneigung und mit Querneigung

Mit einer Längs- und in Tunnelrichtung rechtsseitigen Querstellung des Roboters ergeben sich die Längs- und die Querneigungen in Abbildung 6.57 zu:

$$\begin{aligned}
 Vv_3 &= 88,22 \text{ gon} - 84,22 \text{ gon} = 4,00 \text{ gon} & Vv_4 &= 88,22 \text{ gon} - 86,22 \text{ gon} = 2,00 \text{ gon} \\
 Vv &= (4,00 \text{ gon} + 2,00 \text{ gon}) * \frac{1}{2} = 3,00 \text{ gon} & QN &= (4,00 \text{ gon} - 2,00 \text{ gon}) * \frac{1}{2} = 1,00 \text{ gon}
 \end{aligned}$$

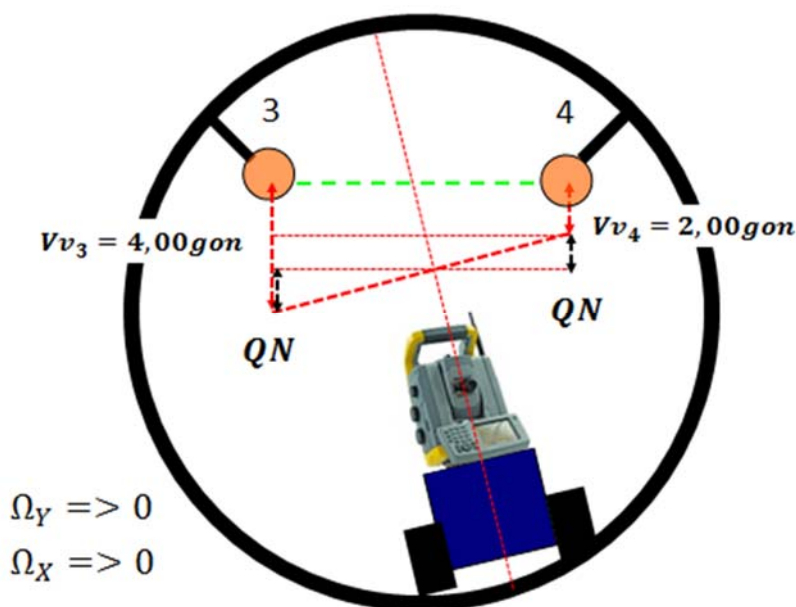


Abb. 6.57: Beispiel einer Tachymeterposition mit Längsneigung und mit Querneigung

Die jeweiligen Querneigungswerte der Prismen 3 und 4 sind auf Grund der symmetrischen Anlage innerhalb der Messpunktfelder und der Tunnelgeometrie gleich groß. Sie unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen. Die Querneigungswerte für  $QN_{2,4,6}$  sind bei einer in Tunnelrichtung rechtsseitigen Querstellung des Roboters negativ und die  $QN_{1,3,5}$  positiv. Das wird im Berechnungsprogramm berücksichtigt. Die Prismen 2 und 6 haben den vor-

zeichengleichen Wert von Prisma 4 und die Prismen 1 und 5 den vorzeichengleichen Wert von Prisma 3.

Die Abbildung 6.58 zeigt die Verhältnisse beispielhaft mit den Prismen 5 und 6.

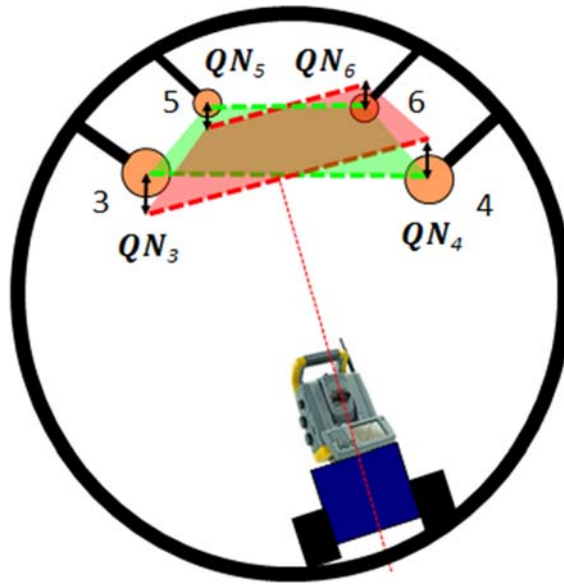


Abb. 6.58: Darstellung der Querneigungswerte QN für die Prismen 3 bis 6 bei einer in Tunnelrichtung gesehenen rechtsseitigen Roboterstellung

### 6.14.3 Berechnung der endgültigen Vertikalwinkel für die Prismensuche

Die berechneten  $QN$ -Werte in Gon werden für die Prismensuche umgerechnet in einen Streckenwert  $QNS_{3,4}$ . Der  $QNS$ -Wert ergibt sich mit der Entfernung zum Prismenring  $3/4$  von  $Sh_{MR}^{3,4}$  und fließt in die Berechnung der Vertikalwinkelkorrekturwerte  $Vv_{QN}$  ein.

$$QNS_{3,4} = \tan QN * Sh_{MR}^{3,4} \quad (6.66)$$

Die Vertikalwinkelkorrekturwerte  $Vv_{QN5,6}$  und  $Vv_{QN1,2}$  berechnen sich zu:

$$Vv_{QN5,6} = \arctan \frac{QNS_{3,4}}{Sh_{MR}^{5,6}} \quad (6.67)$$

$$Vv_{QN1,2} = \arctan \frac{QNS_{3,4}}{Sh_{MR}^{1,2}}$$

Für die Berechnungen der Vertikalsollwinkel für die Prismen 1, 2, 5 und 6 werden die Strecken aus den Näherungskoodinaten herangezogen. Diese werden aus der bekannten Standpunktkoodinate des Tachymeters und den Näherungskoodinaten der Prismen 1, 2, 5 und 6 nach der Formel 6.68 berechnet zu:

$$V_{MR}^1 Soll = 100 gon - \arctan \frac{\Delta h_1}{Sh_1} \quad \text{mit} \quad Sh_1 = \sqrt{(Y_1 - Y_{MR})^2 + (X_1 - X_{MR})^2} \quad (6.68)$$

$$V_{MR}^2 Soll = 100 gon - \arctan \frac{\Delta h_2}{Sh_2} \quad \text{mit} \quad Sh_2 = \sqrt{(Y_2 - Y_{MR})^2 + (X_2 - X_{MR})^2}$$



$$V_{MR}^5 Soll = 100gon - \arctan \frac{\Delta h_5}{Sh_5} \quad \text{mit} \quad Sh_5 = \sqrt{(Y_5 - Y_{MR})^2 + (X_5 - X_{MR})^2} \quad (6.68)$$

$$V_{MR}^6 Soll = 100gon - \arctan \frac{\Delta h_6}{Sh_6} \quad \text{mit} \quad Sh_6 = \sqrt{(Y_6 - Y_{MR})^2 + (X_6 - X_{MR})^2}$$

Die Höhenunterschiede  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$ ,  $\Delta h_5$  und  $\Delta h_6$  berechnen sich aus den vorberechneten Näherungshöhen dieser Prismen und der bekannten Tachymeterstandpunkthöhe. Die abzusteckende Vertikalrichtung für die Prismensuche des Prismas 6,  $VrPS_6$  ergibt sich mit dem Vertikalsollwinkel  $V_{MR}^6 Soll$ , der Vertikalwinkelverbesserung  $Vv$  und dem Vertikalwinkelkorrekturwert  $Vv_{QN6}$ . Wenn die Differenz zwischen dem Vertikalsollwinkel und dem Vertikalwinkel  $> 0$  ist, werden die Vertikalwinkelverbesserungen  $Vv$  für die Prismen 5 und 6 positiv und entsprechend negativ für die Prismen 1 und 2 in die Berechnungsformeln eingesetzt.

$$VrPS_6 = V_{MR}^6 Soll - Vv - Vv_{QN6} \quad (6.69)$$

Nach dem Finden des Prismas 6 wird der reale Vertikalwinkel gemessen,  $V_{6,gem.}$ . Die Differenz  $\Delta V_6$  zwischen diesem und dem vorberechneten Vertikalsuchwinkel  $VrPS_6$  berechnet sich zu:

$$\Delta V_6 = V_{6,gem.} - VrPS_6 \quad (6.70)$$

Die Differenz  $\Delta V_6$  wird als  $\Delta V$  in die Berechnungen für die Prismensuche der Prismen 1, 2 und 5 zusätzlich eingeführt.

$$\begin{aligned} VrPS_5 &= V_{MR}^5 Soll - Vv - Vv_{QN5} + \Delta V \\ VrPS_2 &= V_{MR}^2 Soll - Vv - Vv_{QN2} + \Delta V \\ VrPS_1 &= V_{MR}^1 Soll - Vv - Vv_{QN1} + \Delta V \end{aligned} \quad (6.71)$$

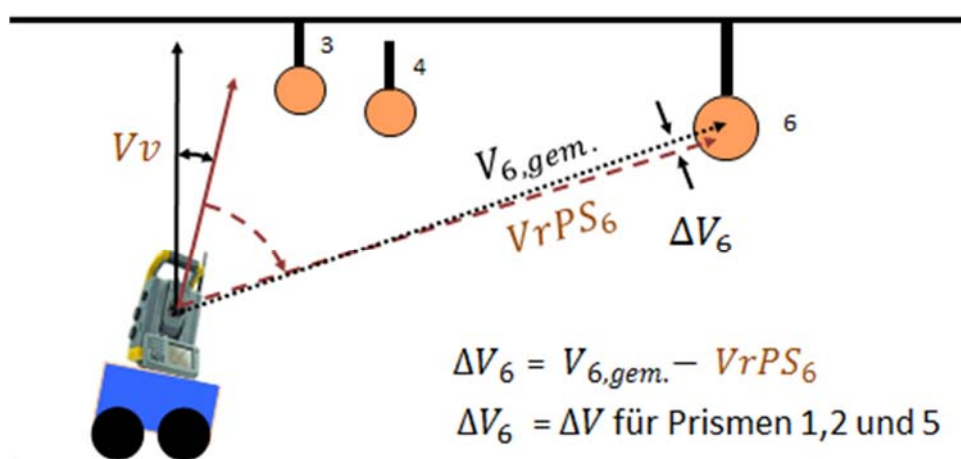


Abb. 6.59: Differenz zwischen vorberechnetem Vertikalsuchwinkel und gemessenem Vertikalwinkel

### 6.15 Ausschluss von falschen Prismenanzielungen

Der Messvorgang (Abbildung 6.60) für den Ausschluss von falschen Prismenanzielungen beginnt nach der Einmessung des Prismas 4. Das Tachymeter wird auf den Vertikalwinkel von 150gon gestellt, wodurch kein anderes Prisma im Tunnelraum eingefangen werden kann (Schritt 1). In dieser Stellung wird der Horizontalkreis auf die vorberechnete Horizontalsollrichtung  $HzPS_6$  zum Prisma 6 gedreht (Schritt 2). Zwischen den Prismen 4 und 6 ist kein Prisma vorhanden. Der Vertikalkreis wird im 3. Schritt auf den vorberechneten Vertikal-suchwinkel nach oben gedreht. Das Gesichtsfeld berührt das Prisma und wird automatisch in das Prismenzentrum geführt und eingemessen (Schritt 4). Das nächste Prisma 8 kann, wie zuvor beschrieben, nicht eingefangen werden. Der 5. Schritt beinhaltet eine erneute Vertikalwinkleinstellung auf 150gon. Der für die Einstellung der Sollhorizontalrichtung vorberechnete Wert für das Prisma 5 ( $HzPS_5$ ) wird durch Horizontalkreisdrehung (Schritt 6) eingestellt. Im Schritt 7 erfolgt die Einstellung des Vertikalkreises auf die vorberechnete Vertikalrichtung zum Prisma 5. Dabei wird das Prisma vom Gesichtsfeld erfasst (Schritt 8) und wieder automatisch zum Prismenzentrum geführt. Anschließend wird dieses Prisma eingemessen.

Für die Prismen 1 und 2 wird in gleicher Weise verfahren. Der Messvorgang für das Prisma 1 beginnt hierfür am Prisma 5 mit der Vertikalwinkelverstellung auf 150gon (Schritt 9) mit anschließender Horizontalkreisdrehung auf die vorberechnete Horizontalrichtung  $HzPS_1$ .

Für die Prismen 3 und 4 sind keine Vertikalwinkelverstellungen auf 150gon nötig, da auf Grund der Steilsichten (Vertikalwinkel von ca. 88gon bei einem DN1600) und dem kleinen Gesichtsfeld mit dem Durchmesser von 10cm ausgeschlossen ist, unerwünschte Prismen in den Fokus zu bekommen. Darüber hinaus befinden sich die nahen Prismen im oberen Tunnelquerschnitt in Richtung First. Je größer der Rohrdurchmesser ist, desto steiler sind die Vertikalwinkel. Andere Prismen können damit im Tunnelbereich nicht erfasst werden.

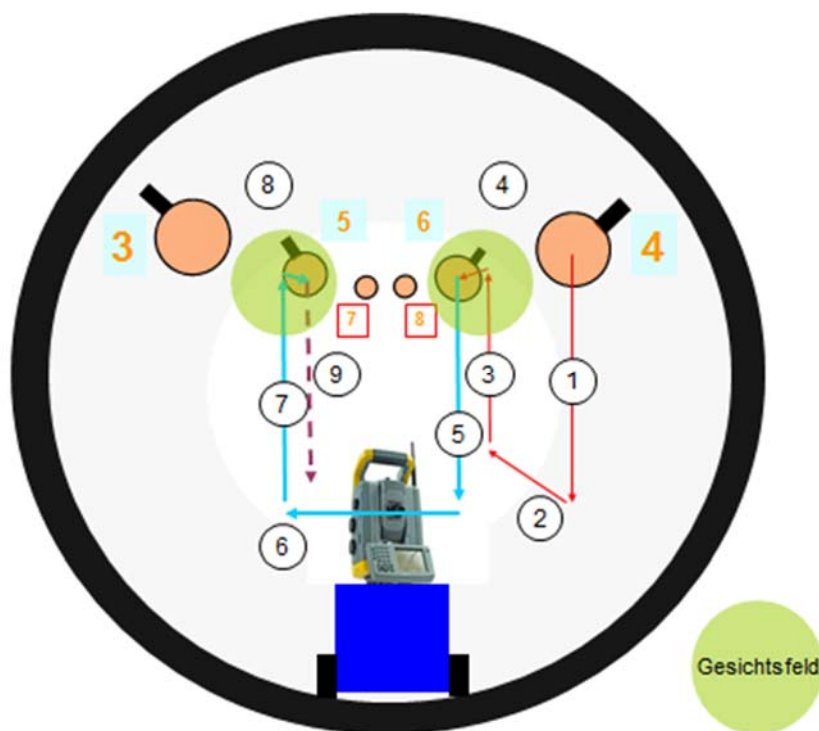


Abb. 6.60: Prismensuchreihenfolge

Die Abbildung 6.61 zeigt z. B. eine Situation, in der das Tachymeter nicht das Prisma 5, sondern das darauf folgende Prisma 7 angezielt hat.

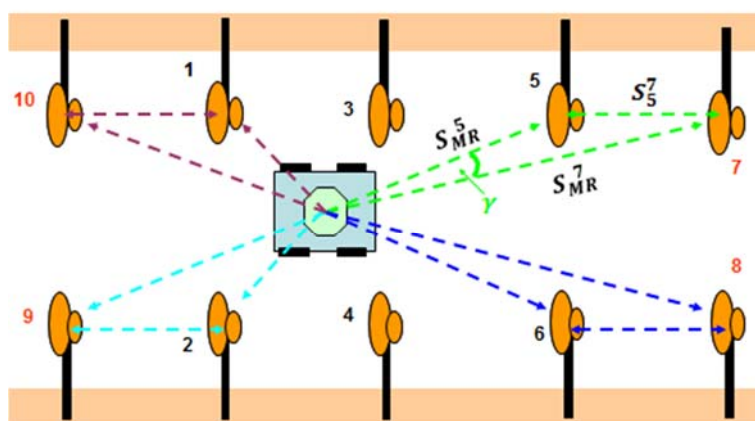


Abb. 6.61: Abschlusskontrolle für die Prismensuche

Gegeben:		Messen:	Berechnen:
$Y_{MR}$	$X_{MR}$	$SMR-5$	$SMR-7 > SMR-5$
		$SMR-5 = SMR-5$	Berechnen:
$Y_5 X_5$	$Y_7 X_7$	Prisma 5 = OK	$Y_{MR-5-7}$ $R_{MR-5} = R_{MR-7} - Y$
		$SMR-6$	$SMR-8 > SMR-6$
		$SMR-6 = SMR-6$	Berechnen:
$Y_6 X_6$	$Y_8 X_8$	Prisma 6 = OK	$Y_{MR-6-8}$ $R_{MR-6} = R_{MR-8} + Y$
		$SMR-2$	$SMR-9 > SMR-2$
		$SMR-2 = SMR-2$	Berechnen:
$Y_2 X_2$	$Y_9 X_9$	Prisma 2 = OK	$Y_{MR-2-9}$ $R_{MR-2} = R_{MR-9} - Y$
		$SMR-1$	$SMR-10 > SMR-1$
		$SMR-1 = SMR-1$	Berechnen:
$Y_1 X_1$	$Y_{10} X_{10}$	Prisma 1 = OK	$Y_{MR-1-10}$ $R_{MR-1} = R_{MR-10} + Y$

Tabelle 6.10: Streckenlängenüberprüfungen von Messprismen im aktuellen Messpunktfeld

Im Dreieck Messroboter - Prisma 5 - Prisma 7 ist der Winkel  $\gamma$  durch die Differenz der Richtungswinkel zu ermitteln. Für die richtige Anzielung des Prismas 5 wird dieser Winkel von der gemessenen Richtung zum Prisma 7 abgezogen. Dieser Fall ist neben den drei anderen Fällen in der Tabelle 6.10 aufgeführt und muss entsprechend im Programm abgebildet werden.

Das Messkonzept geht davon aus, dass die Doppelprismen für die Kontrollmessungen im Druckübertragungsring während des gesamten Vortriebes eingebaut bleiben. Es ist aber nicht auszuschließen, dass ein Prisma oder beide Prismen nicht mehr vorhanden sind oder dass Prismen verschmutzt, beschlagen oder sonst wie nicht für eine Anzielung zur Verfügung stehen. In der Regel ist es möglich, die ersten Prismenringe von der Startbaugrube aus zu sehen. Somit könnte das Problem der fehlenden Prismen in den weiteren Tunnelabschnitten auftreten.

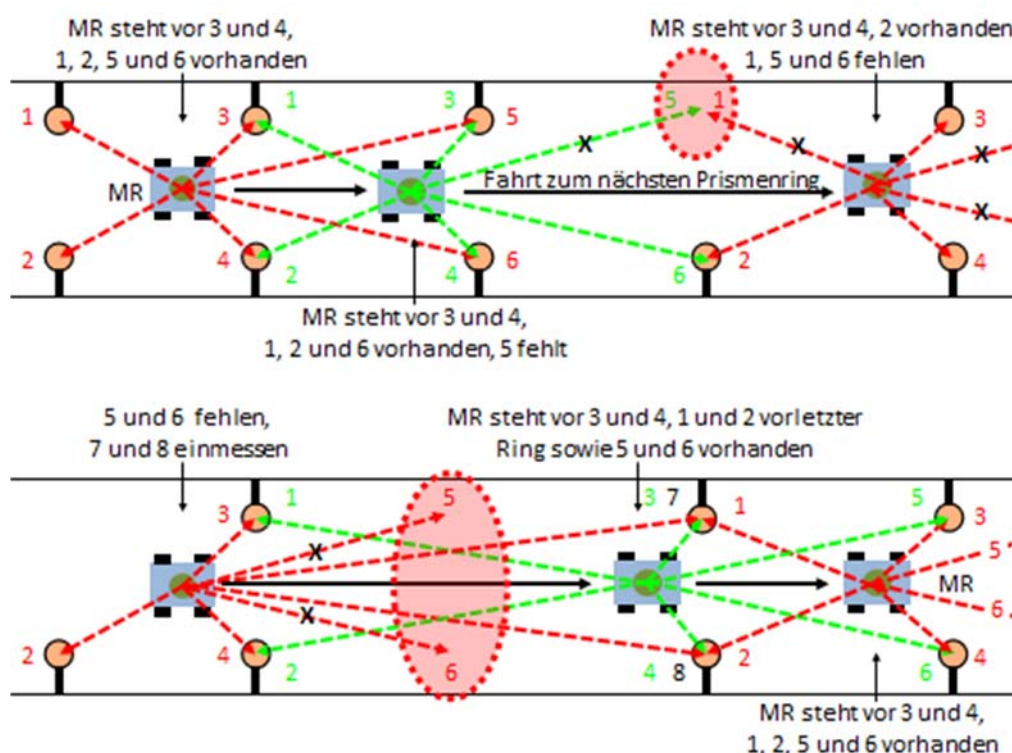


Abb. 6.62: Messablauf bei Prismenverlust

In der vorstehenden Abbildung 6.62 sind neben dem Normalfall mit 6 anzielbaren Prismen verschiedene Möglichkeiten aufgeführt. Eine Änderung des Messablaufes erfolgt, wenn das Prisma 5 oder das Prisma 6 fehlt oder wenn beide Prismen nicht mehr vorhanden sind. Wenn z. B. das Prisma 5 fehlt, werden die Prismen 1, 2, 3, 4 und 6 eingemessen. Anschließend erfolgt die Messroboterfahrt zum nächsten Prismenring. Hier werden die Prismen 2 – 6 im Normalfall eingemessen. Sind die Prismen 5 und 6 auch nicht vorhanden, werden die Prismen des nächsten Prismenringes mit den Prismen 7 und 8 eingemessen. Der Roboter fährt im Anschluss daran vor diesen Prismenring. Das Tachymeter misst das Messpunktfeld mit allen gefundenen Prismen 1 - 6 ein, wobei die Prismen 1 und 2 die des vorletzten Prismenringes sind. Die Zuordnung der Prismen mit den jeweiligen Prismennummern wird im Messprogramm berücksichtigt. Sollten die Prismen 7 und 8 auch nicht mehr für eine Anzielung zur Verfügung stehen, wird die Messung abgebrochen. Der Messroboter fährt dann zum Startschacht zurück.

### 6.17 Prismenkoordinatenberechnung im Tachymeterschrägsystem

Für alle Prismen 1 bis 6 liegen nach dem Suchen, Finden und Einmessen Messwerte als Horizontalwinkel  $H_{z_{MR}^{1-6}}$ , Vertikalwinkel  $V_{MR}^{1-6}$  und Schrägstrecken  $S_{s_{MR}^{1-6}}$  vor. Mit diesen Messelementen werden Koordinaten mittels Polarverfahren berechnet. Daraus ergibt sich ein eigenständiges Koordinatensystem (Tachymeterschrägsystem), dessen Koordinatenursprung in das Tachymetermesszentrum mit z. B.  $Y_{MR}=1.000,000$ ,  $X_{MR}=10.000,000$  und  $Z_{MR}=100,000$  gelegt wird (Abbildung 6.63).

Die Orientierung des Koordinatensystems erfolgt z. B. über das Prisma 5 oder auch Prisma 6, welche am weitesten vom Tachymeterstandpunkt entfernt sind. Mit den Messelementen  $V_{MR}^5$  und  $S_{s_{MR}^5}$  erfolgt die Festlegung des Koordinatensystems zu:

mit

$$Y_5 = Y_{MR} + S_h = 1.000,000 + S_h$$

$$S_h = \sin V_{MR}^5 * S_{s_{MR}^5} ,$$

$$X_5 = X_{MR} = 10.000,000 , \quad (6.72)$$

$$Z_5 = Z_{MR} + \Delta h = 100,000 + \Delta h ,$$

mit

$$\Delta h = \cos V_{MR}^5 * S_{s_{MR}^5} .$$

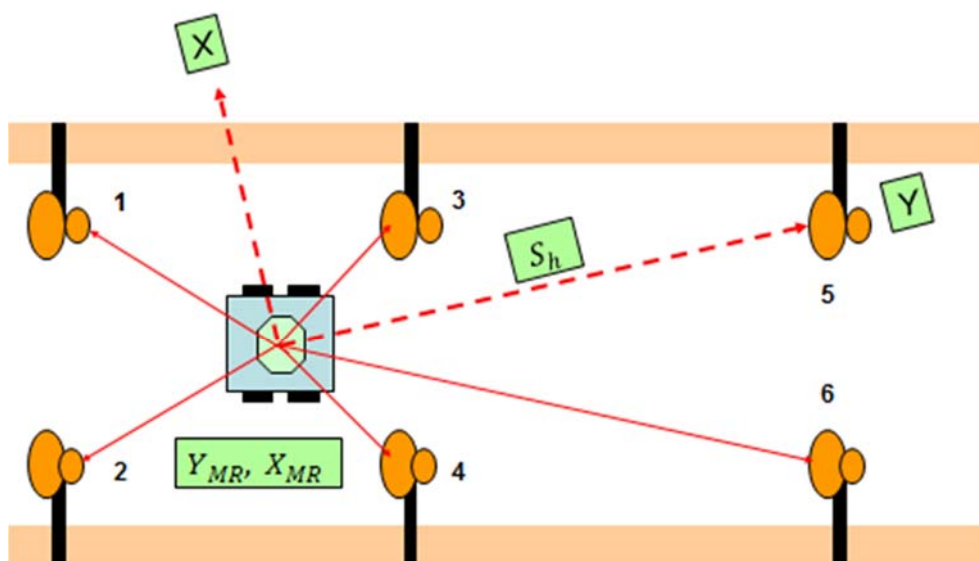


Abb. 6.63: Festlegung des Koordinatensystems in Tachymeterschrägstellung



### 6.18 Überführung der Tachymeterkoordinaten in das Vortriebsnetz

Mit der Koordinatenberechnung aller 6 Prismen innerhalb eines Messpunktfeldes in einem Tachymeterschrägsystem  $S$  mit lokalen Koordinaten sind die Voraussetzungen geschaffen für die Überführung der Prismenkoordinaten in das endgültige Vortriebsnetz  $VTN$  durch eine Transformation.

Die Überführung des Schrägsystems in das Vortriebsnetzsystem erfolgt durch eine 7-Parameter-Transformation, welche in der Geodäsie als Abbildung von Koordinaten geodätischer Punkte von einem Koordinatensystem in ein anderes verstanden wird. Das Ausgangssystem kann auf das Zielsystem gegebenenfalls durch maximal 7 Transformationsparameter, 3 Verschiebungen, 3 Verdrehungen und 1 Maßstab abgebildet werden. Entsprechende Ausführungen finden sich in ELING (2009).

Im Kapitel 6.3 ist das Vortriebsnetz für das autonome Messverfahren beschrieben worden. Die jeweiligen Messpunktfelder werden aneinander gereiht. Nach diesem Prinzip erfolgen auch die Koordinatentransformationen (Abbildung 6.64).

Im ersten Messpunktfeld liegen die Koordinaten der 6 Doppelprismen im Tachymeterschrägsystem  $S$  vor ( $S_1 - S_6$ ). Die Punkte ( $S_1 - S_4$ ) sind identische Punkte mit den Punkten  $VTN_1 - VTN_4$  des Vortriebsnetzes. Mit den Transformationsparametern werden die Doppelprismen  $S_5$  und  $S_6$  (Schritt 1 der Abbildung 6.64) in das Zielsystem mit den Punktnummern  $VTN_5$  und  $VTN_6$  überführt. Für das zweite Messpunktfeld werden wieder 6 Doppelprismen ( $S_1 - S_6$ ) im Schrägsystem eingemessen und in Koordinaten umgerechnet.

Die Prismen  $VTN_3 - VTN_6$  im ersten Messpunktfeld bilden die identischen Punkte  $VTN_1 - VTN_4$  (Schritt 2) im zweiten Messpunktfeld. In dieser Reihenfolge werden alle weiteren Messpunktfelder (Schritt 3) der jeweiligen „Schrägsysteme“ in das Vortriebsnetz durch fortgesetzte Transformation bestimmt.

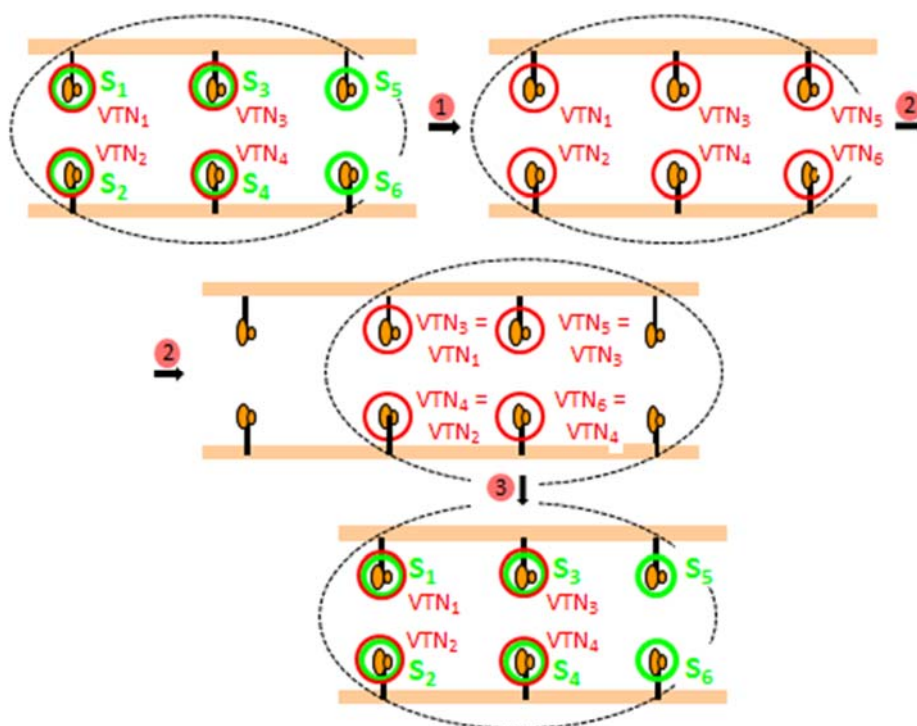


Abb. 6.64: Aneinander gereihten Koordinatentransformationen



Mit Erreichen des letzten Messpunktfeldes an bzw. vor der Vortriebsmaschine liegen von allen Doppelprismen die 3D-Koordinaten im Vortriebsnetz vor. Mit diesen werden die Rohrsohlenkoordinaten entsprechend der Rohrsohlenkoordinatenberechnung (Kapitel 6.7.3) für die Vergleichsstationen bestimmt.

Damit liegen Koordinaten der Ist-Achse an den Stationen vor, an denen die Prismenringe innerhalb des Tunnels positioniert sind. Mit den Ergebnissen der Vortriebskontrollvermessung ist der Bezug zur Sollachse herzustellen. Berechnet werden die Differenzbeträge zur Sollachse, indem jeder einzelne Rohrsohlenpunkt in Beziehung zu dieser gesetzt wird (Abbildung 6.65). Der Berechnungsgang entspricht der beschriebenen Vorgehensweise mit entsprechenden Abfragen wie im Kapitel 6.7.2.

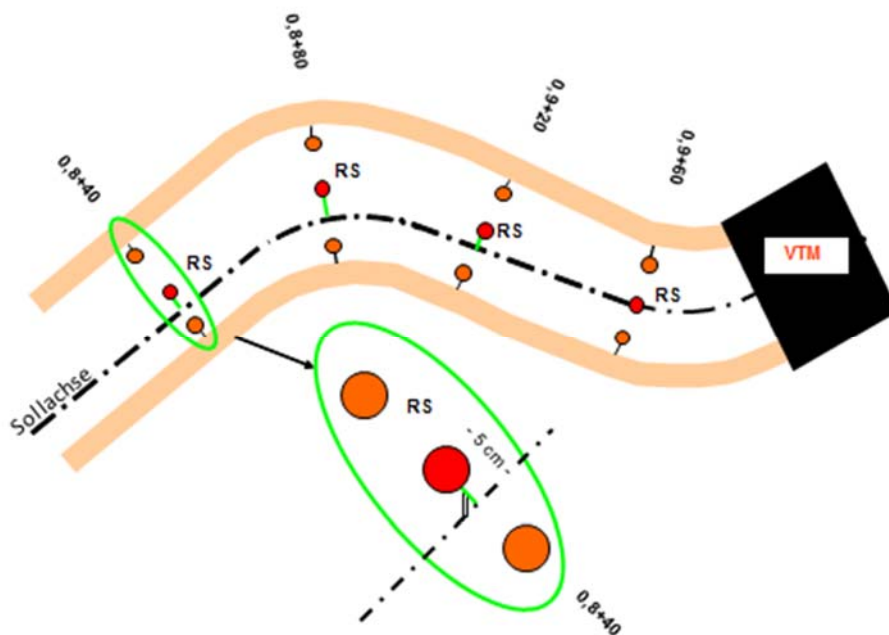


Abb. 6.65: Rohrsohlenpunkte RS in Bezug zur Sollachse, Lage

Die möglichen Differenzbeträge in der Lage und Höhe werden für die Korrektur der Maschinenfahrt herangezogen, d. h. die seitlichen und vertikalen Ablagen zur Sollachse sollen bei der weiteren Fahrt der Vortriebsmaschine auf „Null“ zurückgeführt werden, damit die Maschine auf der Solltrasse die Einfahrbrille im Zielschacht erreicht.

Die Ergebnisse der Berechnungen der Abstände zwischen der Soll- und Istachse bezogen auf die Tunnelstationierung werden für die Messungen des Auftraggebers und des Auftragnehmers in Diagrammform dargestellt. Das gilt für die Lage- und Höhendarstellungen.

Die nachfolgenden Diagrammdarstellungen (Abbildungen 6.66 und 6.67) zeigen beispielhaft das Ergebnis der Kontrollvermessungen des Auftraggebers und des Auftragnehmers inklusiv eines Kreismessergebnisses. Die Übersicht gibt ein umfassendes Bild aller Vermessungsergebnisse und ermöglicht einen Vergleich bzw. eine Überprüfung auf Plausibilität.

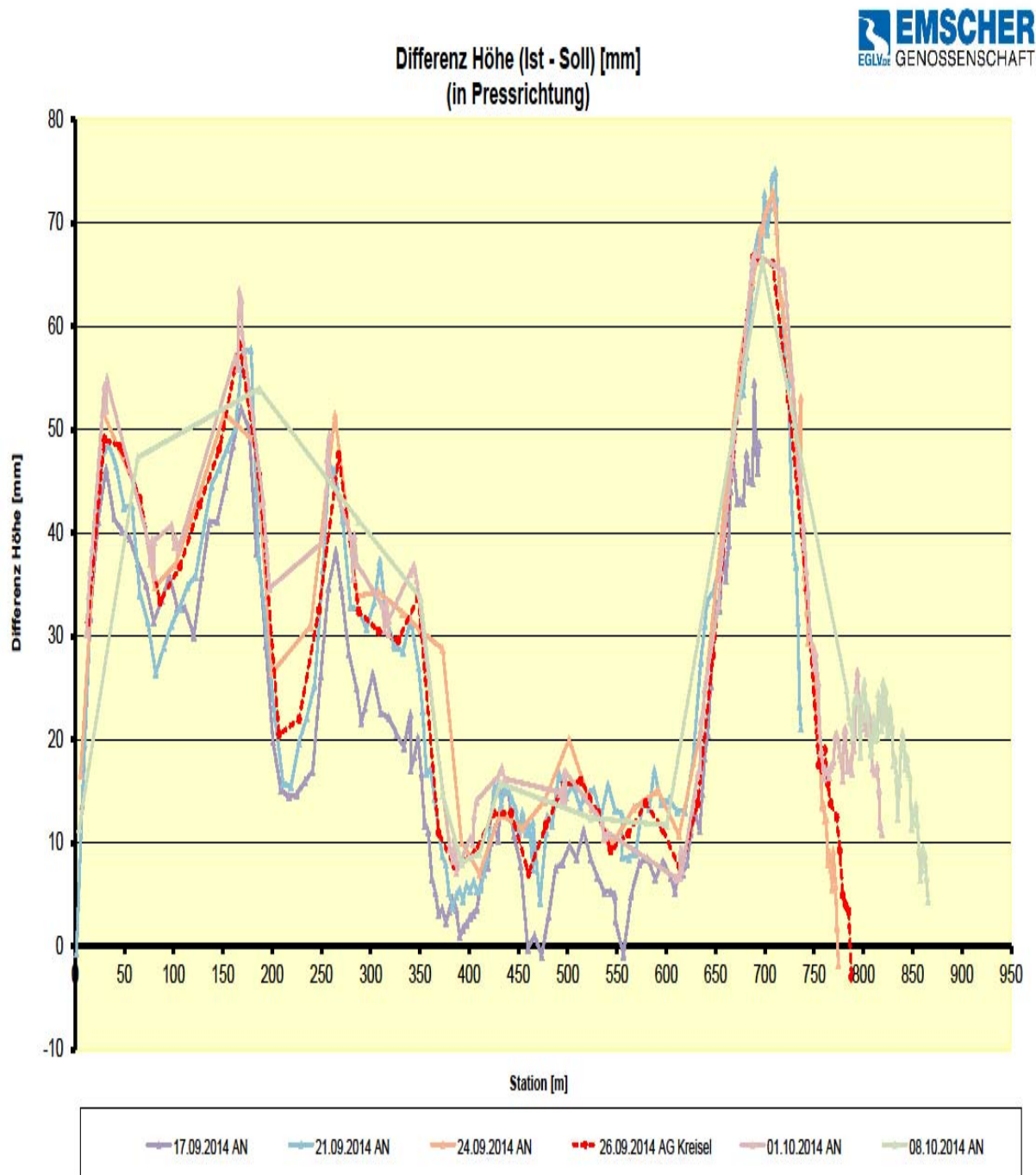


Abb. 6.66: Beispiel eines Höhenkontrollvermessungsergebnisses durch AG und AN

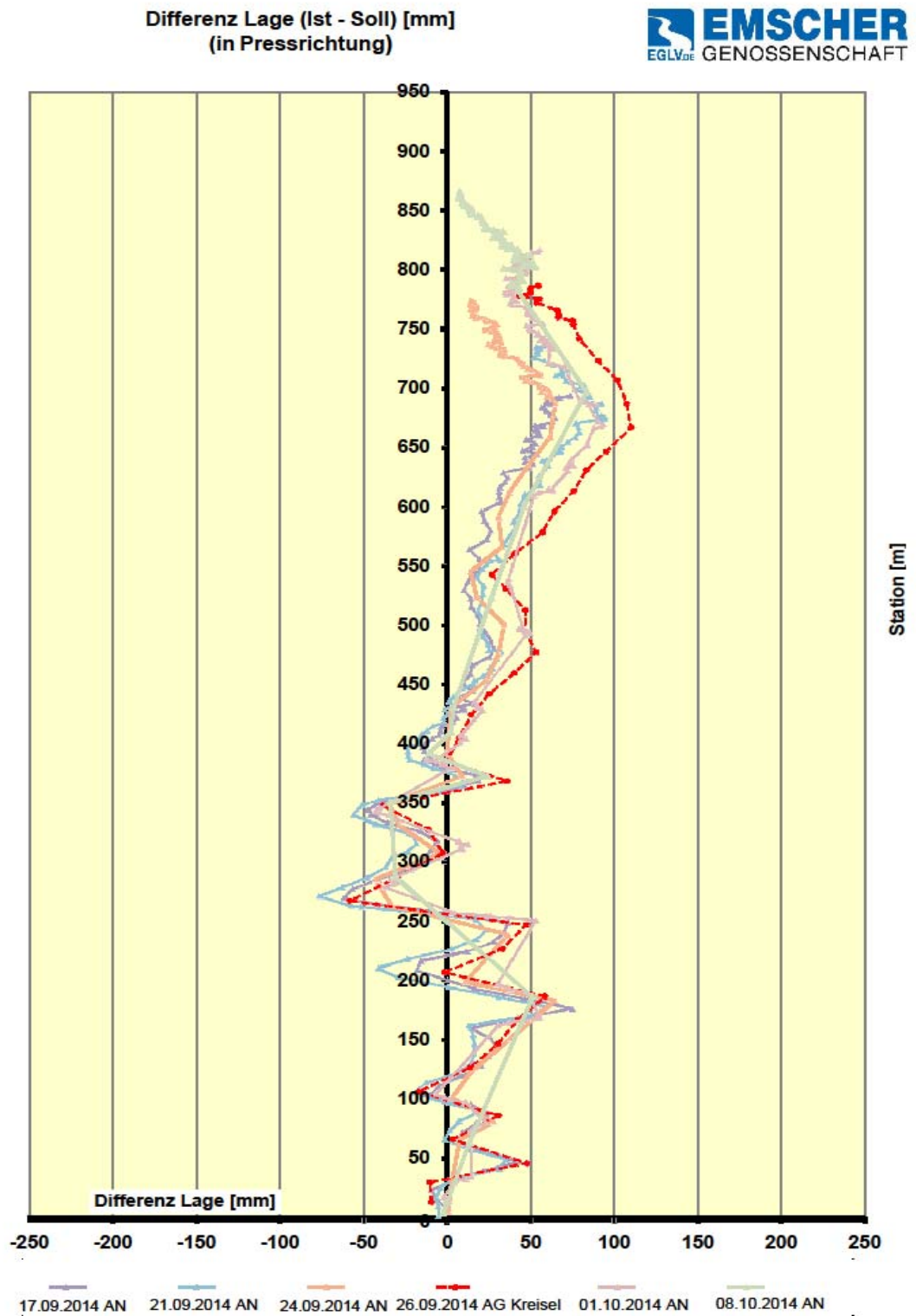


Abb. 6.67: Beispiel eines Lagekontrollvermessungsergebnisses durch AG und AN

Durch die Kreismessung des Auftraggebers bestätigen sich die auftragnehmerseitigen Kontrollvermessungen. Bei der Lagemessung fällt die Diagrammlinie der Kreismessung in den Korridor der Einzelmessungen des Auftragnehmers. Die Kreismessung wurde ca. 150m vor Zieleinfahrt durchgeführt, um auf der Restvortriebsstrecke eine mögliche Kurskorrektur vornehmen zu können. Der besseren Übersicht wegen sind nur die letzten 5 Auftragnehmermessungen (AN) und die letzte Auftraggebermessung (AG) mit der Kreismessung vom 26.9.2014 dargestellt.

An der Station 780 fallen die Diagrammlinien nahezu zusammen. Die dargestellte Messung vom 8.10.2014 in der Station 870 nähert sich der Sollachse, so dass eine Einfahrt in den Zielschacht mit den maximal vertraglich zulässigen Abweichungen im Projekt „Umbau des Emschersystems“ horizontal von  $\pm 100\text{mm}$  für die Lage und vertikal von  $\pm 50\text{mm}$  in der Höhe realisiert werden konnte.

Weichen die Diagrammlinien zwischen den Auftraggeber- und Auftragnehmervermessungen deutlich voneinander ab, können Unklarheiten durch Vergleich z. B. der Rohdaten oder durch eine Wiederholungsmessung geklärt werden.

### 7. Die Messverfahren im Vergleich mittels Simulationsberechnungen

Nach der Beschreibung des roboterbasierten Messverfahrens vom praktischen Ablauf bis zum Ergebnis der Koordinierung der Messprismen im direkten Bereich der Vortriebsmaschine bzw. der koordinativen Einbeziehung der Prismen des Navigationssystems für die Maschinensteuerung soll in den nächsten Kapiteln durch Simulationsberechnungen aufgezeigt werden, dass das autonome Messverfahren, was die Genauigkeiten anbelangt, eine Alternative zu den herkömmlichen Vortriebskontrollvermessungen ist. Mit einer Simulationsberechnung kann die optimale Lage von Festpunkten und die erreichbare Genauigkeit sowie die Zuverlässigkeit der Beobachtungen in geodätischen Netzen bestimmt werden. Ein weiteres Ziel der Simulationsberechnungen ist die Optimierung der Messanordnung und des Messaufwandes.

Auf Grund der in den Startgruben beengten Verhältnisse finden entsprechend den Ausführungen im Kapitel Portalnetz die Herablegungsmessungen durch Steilvisuren statt. Die Genauigkeit für die Richtungsübertragung in den Tunnel liegt in der sehr sorgsamem Messung der Anfangsrichtung. In den nachfolgenden Beispielen werden die Simulationsberechnungen mit drei und sechs Kopfbalkenprismen durchgeführt, um festzustellen, ob dadurch eine Genauigkeitssteigerung erreicht werden kann. Eine größere Anzahl von Prismen ist für die Herablegung von Vorteil, weil mögliche Sichtbehinderungen z. B. durch Kranaktivitäten oder Verschmutzungen von Prismenkörpern zum Ausschluss von Prismenanzahlungen führen können. Für die Herablegungsmessungen werden gleiche Ausgangsparameter angesetzt, um einen Simulationsvergleich zwischen dem Polygonzug und dem Messroboternetz durchführen zu können.

Wie schon ausführlich in den vorangestellten Kapiteln beschrieben, gehören Tunnel mit einem Durchmesser von DN1600 zu den besonders schwierigen Haltungen für die Begehung bzw. für die Vermessungsarbeiten wegen des begrenzten Innenraumes. Daraufhin müssen die Vortriebsnetze ausgewählt werden. Infolgedessen kommen für die Kontrollvermessungen Polygonzugmessungen zur Ausführung. Auch in Tunneln mit Durchmessern von DN2800, wie im Projekt Abwasserkanal Emscher, werden für die Kontrollvermessungen in der Regel Polygonzüge gewählt. Der Aufwand für den Einbau der Konsolen auf Basis der angeführten Netzvarianten ist sehr hoch und findet bei den genannten Tunneldurchmessern in der Regel keine Anwendung. Die Schwierigkeiten durch die beengten Verhältnisse bei der Kontrollvermessung werden durch den Einsatz des Messroboters beseitigt. Von daher liegt der Fokus von vergleichenden Simulationsberechnungen auf der Polygonzug- und Messrobotermessung.

Für die Netzvarianten Polygonzug- und Messrobotermessung werden Zielweiten zwischen den Tachymeterstandpunkten mit 40m in die Simulationsberechnungen eingeführt, um einen Vergleich auf Basis gleicher Ausgangsparameter durchführen zu können. Für beide Verfahren werden gleiche Eingangswerte gewählt. Der Fokus bei den Simulationen liegt nicht auf der differenzierten Steuerung der Berechnungen, z. B. durch unterschiedliche Gewichtungen von Beobachtungen, sondern der Vergleich soll aufzeigen, dass das Messroboterverfahren mit herkömmlichen Polygonzugmessungen vergleichbar ist bzw. ein Genauigkeitsgewinn erreicht werden kann und welchen Einfluss das neue Verfahren auf die Zuverlässigkeit der geplanten Messanordnung ausübt.

Polygonzugmessungen erfolgen gewöhnlich mit größeren Zielweiten als mit 40m. Standpunktabstände von 60-100m sind in Tunneln mit DN1600 je nach Trassierung möglich. Deswegen erfolgt eine Simulationsberechnung für einen Polygonzug mit 80m-Zielweiten und wird mit der Messrobotermessung, ebenfalls mit Zielweiten von 80m, verglichen. Eine Haltungslänge von 1.200m und ein Rohrdurchmesser von DN1600 liegen allen Simulationsberechnungen zu Grunde. Die Vortriebsmaschine durchfährt für das gewählte Simulationsbeispiel eine Trasse mit einer Geraden und einer S-Kurve. Die 80m-Zielweiten

lassen sich auf Grund der Trassierung nicht durchgängig einhalten (Abbildung 7.5). Die Zielweiten ergeben sich aus den Ausführungen des Kapitels 6.7.1.

Als Eingangswerte für die Simulationsberechnungen gehen die Winkel- und Streckenmessgenauigkeiten aus dem Datenblatt des Tachymeters Leica TS15 ein (Leica 2010):

$$\begin{aligned} &0,3\text{mgon für die Horizontalwinkelmessung,} \\ &0,3\text{mgon für die Vertikalwinkelmessung und} \\ &\sqrt{(1,0\text{mm})^2 + (1,5\text{mm/km})^2} \text{ für die Streckenmessgenauigkeit.} \end{aligned}$$

Die Messanordnungen für die Netzvarianten Polygonzug und Messroboternetz werden in den nachfolgenden Abbildungen 7.1 und 7.2 gezeigt. Der Punkt 300000 ist der herabgelegte Standpunkt, mit dem die Richtung unter Nutzung der Kopfbalken- und Presswandprismen in den Tunnel bzw. zu den jeweiligen Messprismen vorgetragen wird. Der simulierte Standpunkt wurde höhenmäßig auf Grund der durchschnittlichen Pressgrubentiefen im Abwasserkanalprojekt ca. 24m tiefer als die Kopfbalkenprismen angesetzt.

### 7.1 Netzsimulationen

Die Abbildung 7.1 zeigt die Kopfbalkenprismen (700001 bis 700006) am Pressgrubenrand und die Prismen 400000 und 800000, die vom Grundsatz her nur für das autonome Messverfahren als Presswandprismen benötigt werden. Wegen der einheitlichen Ausgangslage werden diese Prismen, wie zuvor erläutert, im Bereich der Schachtssole auch in die Polygonzugmessung einbezogen.

Die Beobachtungen für die Herablegungsmessung auf dem Standpunkt 300000 und die Beobachtung des ersten Polygonpunktes 300001 im Tunnel sind in der Abbildung mit schwarzen Pfeilen kenntlich gemacht. Auf dem Standpunkt 300000 werden die Presswandprismen, der Standpunkt 300000 und der nächste Polygonpunkt 300002 angezielt (grüne Pfeile). Die Beobachtungen werden bis zum Zielschacht in dieser Weise fortgeführt.

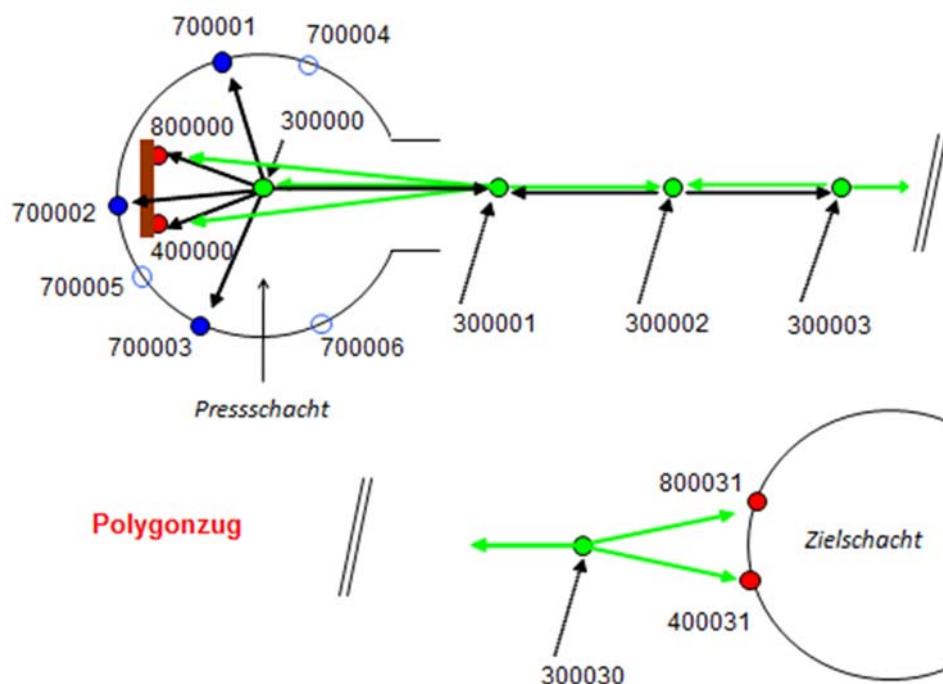


Abb. 7.1: Messanordnung Simulation Polygonzug



In der Abbildung 7.2 werden die Beobachtungen für das Messroboternetz in gleicher Weise standpunktweise mit schwarzen und grünen Pfeilen dargestellt. Auch hier endet der Messvorgang für die Simulationsberechnung am Zielschacht.

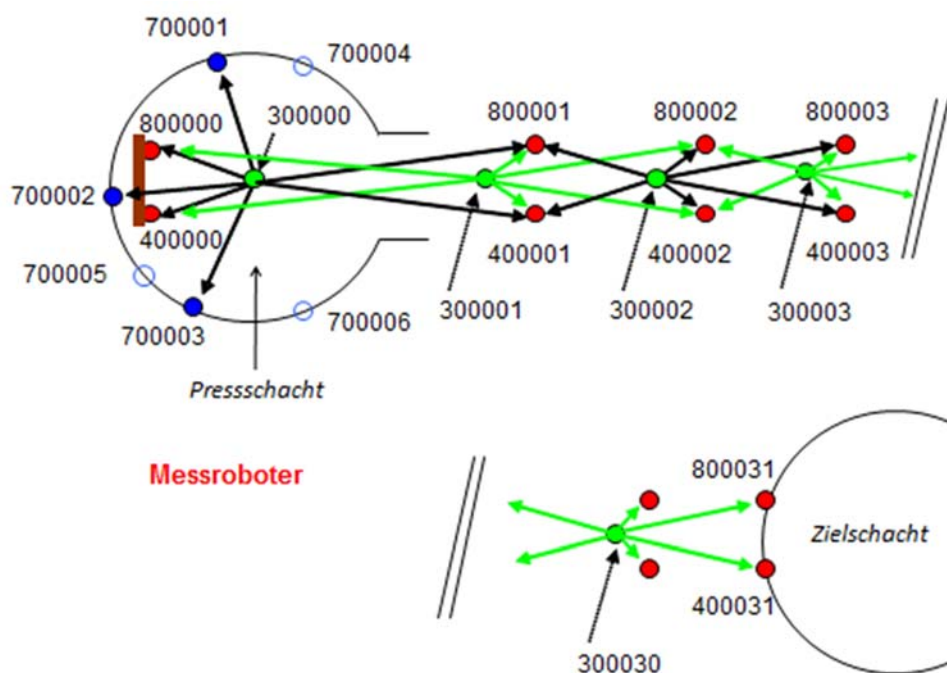


Abb. 7.2: Messanordnung Simulation Messroboter

Die Kopfbalkenprismen sind aus dem Portalnetz koordinatenmäßig bestimmt worden und werden als feste Koordinatenwerte in die Simulationsberechnung (GeoTec Programm Panda) eingeführt. Die fest gehaltenen Punkte werden bei den Eingangswerten (Tabelle 7.1) mit einem + gekennzeichnet.

PNR	Y	X	Z
700001+	87057,9210	16579,4560	77,0000
700002+	87065,6520	16580,1140	77,0000
700003+	87068,7770	16572,2190	77,0000
700004+	87064,4560	16567,4090	77,0000
700005+	87057,8030	16568,2710	77,0000
700006+	87054,9680	16573,8150	77,0000
300000	87062,1720	16573,8460	53,3700

Tab. 7.1: Eingangswerte für die Simulationsberechnungen

Die Simulationsberechnungen für einen Polygonzug und das Messroboterverfahren auf Basis von 40m – Stationsintervallen mit 3 und 6 Kopfbalkenprismen führen zu den in der Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 aufgeführten Fehlerellipsen für die Presswandprismen 400000 und 800000, dem Standpunkt im Schacht 300000 und die beiden Durchschlagspunkte 400031 und 800031 am Zielschacht.

Polygonzug		A(mm)	B(mm)	C(mm)		A(mm)	B(mm)	C(mm)
300000	3 Prismen	0,22	0,05	0,02	6 Prismen	0,16	0,02	0,02
400000		0,76	0,22	0,08		0,76	0,16	0,03
400031		25,99	4,07	0,77		25,42	4,05	0,75
800000		0,72	0,22	0,08		0,72	0,16	0,03
800031		25,99	4,07	0,77		25,43	4,06	0,75

Tab. 7.2: Simulationsergebnis für den Polygonzug mit 3 und 6 Kopfbalkenprismen, 40m- Intervall

Messroboter		A(mm)	B(mm)	C(mm)		A(mm)	B(mm)	C(mm)
300000	3 Prismen	0,22	0,05	0,02	6 Prismen	0,16	0,02	0,02
400000		0,77	0,22	0,08		0,77	0,22	0,03
400031		20,69	3,02	0,58		19,97	3,00	0,58
800000		0,74	0,22	0,08		0,74	0,22	0,03
800031		20,69	3,02	0,58		19,97	3,00	0,58

Tab. 7.3: Simulationsergebnis für das Messroboterverfahren mit 3 und 6 Kopfbalkenprismen, 40m- Intervall

Anhand der Ergebnisse der Tabelle 7.2 zeigt sich, dass eine Genauigkeitssteigerung für den Standpunkt 300000 durch die Einbeziehung aller 6 Prismen nicht erkennbar ist. Geringere Unterschiede zwischen 3 und 6 Prismen zeigen sich bei den Fehlerellipsen der Netzkpunkte 400031 und 800031 im Bereich des Zielschachtes. Die Simulationsberechnung für das Messroboterverfahren kommt zu ähnlichen Ergebnissen (Tabelle 7.3). Aus Genauigkeitsgründen sind 6 Prismen nicht zwingend erforderlich. Wie im Kapitel 3.8 „Vortriebsnetz“ aufgeführt, ist neben den Genauigkeitskriterien auch die Zuverlässigkeit einer geplanten Messanordnung zu prüfen (Kapitel 7.3).

Nachfolgend sind die Simulationsergebnisse in graphischer Darstellung für den Polygonzug (Abbildung 7.3) und für das Messroboterverfahren (Abbildung 7.4) mit 3 Prismen für 40m – Intervalle dargestellt.

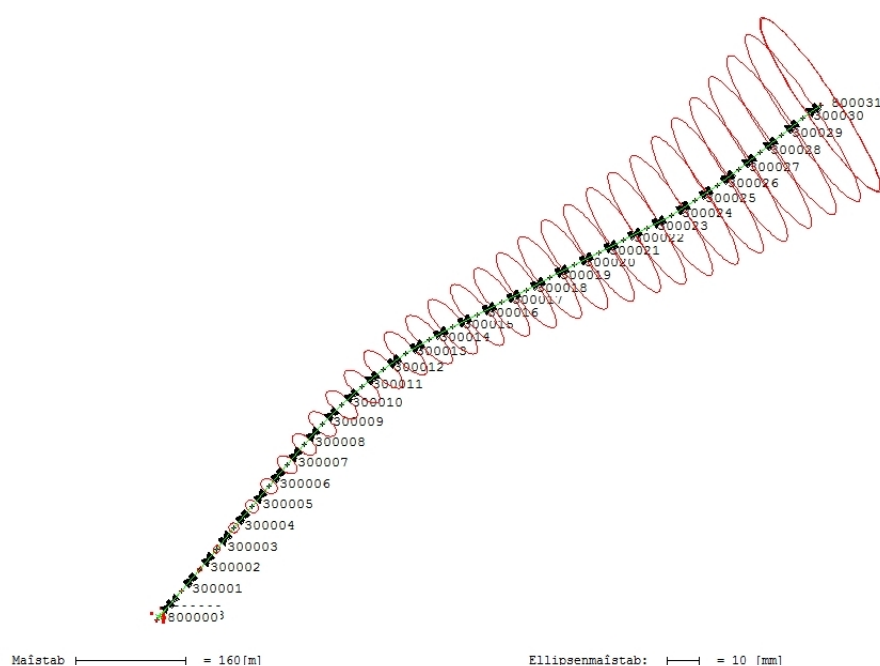


Abb. 7.3: Fehlerellipsen für Polygonzugmessung, 40m-Intervalle

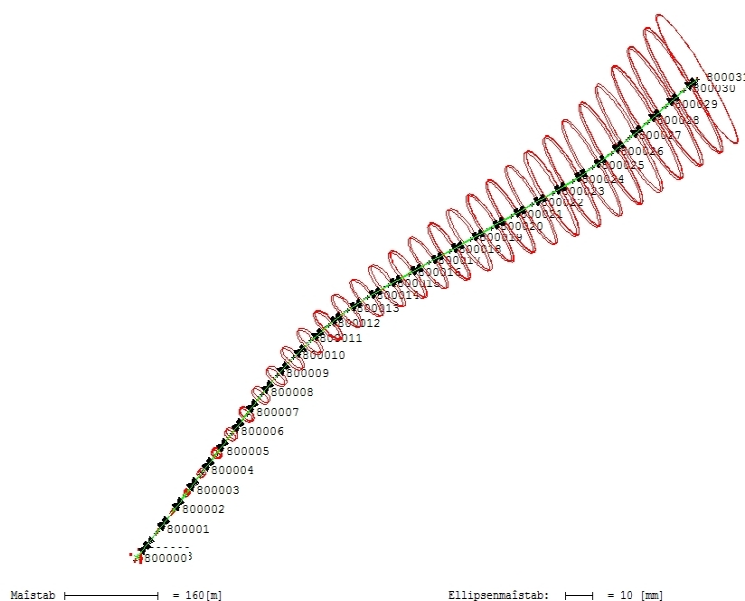


Abb. 7.4: Fehlerellipsen für Messrobotermessung, 40m-Intervalle

Die Simulation für einen Polygonzug mit Standpunktabständen von 80m kann bezogen auf das Trassierungsbeispiel nicht durchgängig erfolgen. Die S-Kurve erlaubt nur Zielweiten von 40m (Abbildung 7.5). Die Simulationsergebnisse für die Polygonzugmessung und das Messroboterverfahren (40-80m-Intervall) am Zielschacht zeigt Tabelle 7.4.

		A(mm)	B(mm)	C(mm)		A(mm)	B(mm)	C(mm)
400031	<b>Polygonzug</b>	22,11	3,54	0,93	<b>Messroboter</b>	17,35	2,62	0,75
800031		22,11	3,54	0,93		17,35	2,62	0,75

Tab. 7.4: Simulationsergebnisse für die Polygonzugmessung und die Messrobotermessung mit 3 Kopfbalkenprismen, 40-80m-Intervall

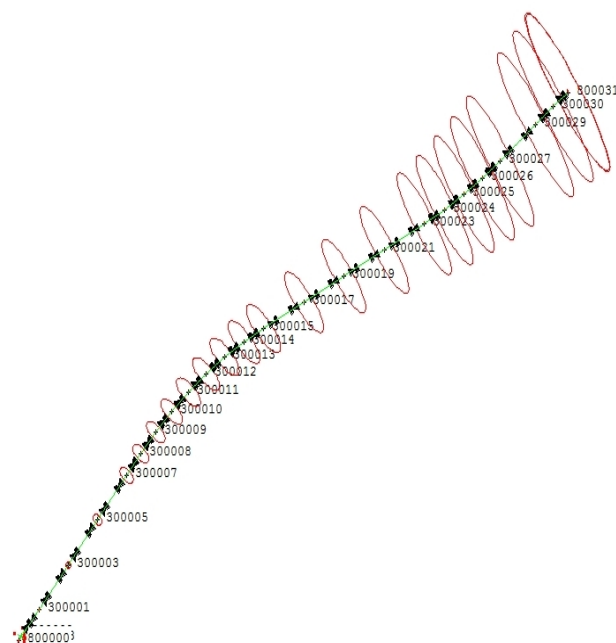


Abb. 7.5: Fehlerellipsen für Polygonzugmessung, 40-80m – Intervalle

## 7.2 Vergleich der Messverfahren und Berechnung von Genauigkeitssteigerungen

Den in Tabellen 7.2 bis 7.4 aufgeführten Fehlerellipsen liegen einfache Standardabweichungen ( $1\sigma$ ) zu Grunde. Für eine bessere Aussage bezüglich der Durchschlagsgenauigkeit bzw. auf Grund der hohen Genauigkeitsanforderungen im Tunnelvortrieb wird der Vertrauensbereich erhöht, indem eine Sicherheitswahrscheinlichkeit mit 95% bzw. 99% gewählt wird. Fehlerellipsen mit Standardabweichungen von  $1\sigma$  werden als Helmertsche Fehlerellipsen bezeichnet, während Ellipsen mit einem abweichenden Vertrauensniveau Konfidenz-ellipsen genannt werden. Zwischen beiden Ellipsen besteht ein Achsverhältnis bei gegebenem  $\sigma_0^2$  zu:

$$\frac{A_K}{A_F} = \sqrt{\chi_{3,1-\alpha}^2} \quad (7.1)$$

Hierin ist  $A$  die große Halbachse der Ellipse, wobei  $K$  für die Konfidenzellipse und  $F$  für die Helmertsche Fehlerellipse steht.

Die Berechnung der dreidimensionalen Konfidenzellipse erfolgt mit Hilfe der Tabelle A.4 (NIEMEIER 2008), wo die Quantile der Chi-Quadratverteilung für 95% und 99% aufgeführt sind.

$$A_K = A_F * \sqrt{7,81} \quad (2\sigma) \quad \text{und} \quad A_K = A_F * \sqrt{11,35} \quad (3\sigma) \quad (7.2)$$

Weitergehende Ausführungen können der Literatur NIEMEIER (2008) entnommen werden.

Damit ergeben sich Fehler- und Konfidenzellipsen für den Polygonzug und dem Messroboternetz. Der Vergleich zeigt die Genauigkeitssteigerung durch das Messroboterverfahren.

<b>3 Kopfbalkenprismen 40m-Intervall</b>				
	(mm)	A	B	C
68 % =	Polygonzug	25,99	4,07	0,77
1 Sigma	Messroboter	20,69	3,02	0,58
95 % =	Polygonzug	72,63	11,37	2,15
2 Sigma	Messroboter	57,82	8,44	1,62
99 % =	Polygonzug	87,56	13,71	2,59
3 Sigma	Messroboter	69,70	10,17	1,95
Genauigkeitssteigerung		<b>20%</b>	<b>26%</b>	<b>25%</b>

<b>3 Kopfbalkenprismen 40-80m-Intervall</b>				
	(mm)	A	B	C
68 % =	Polygonzug	22,11	3,54	0,93
1 Sigma	Messroboter	17,35	2,62	0,75
95 % =	Polygonzug	61,79	9,89	2,60
2 Sigma	Messroboter	48,49	7,32	2,10
99 % =	Polygonzug	74,49	11,93	3,13
3 Sigma	Messroboter	58,45	8,83	2,53
Genauigkeitssteigerung		<b>21%</b>	<b>26%</b>	<b>22%</b>

Tabelle 7.5: Genauigkeiten am Durchschlagspunkt für den Vergleich Messroboterverfahren gegenüber Polygonzugmessung, Zusammenstellung mit Angaben der Genauigkeitssteigerung

Der Simulationsvergleich mit 40m-Zielweiten und 3 Kopfbalkenprismen zeigt in diesen Fällen, dass eine Genauigkeitssteigerung am Durchschlagspunkt durch das Messroboterverfahren gegenüber der Polygonzugmessung erreicht wird. Die Genauigkeiten verbessern sich quer (A) zur Tunnelachse um 20% und längs (B) zur Tunnelachse um 26% sowie vertikal (C) um 25%. Eine doppelte Anzahl von Prismen führt, wie schon ausgeführt, nicht zu einer grundlegenden Steigerung der Genauigkeiten am Endpunkt des Polygonzuges bzw. des Messroboternetzes. Wird ein Simulationsvergleich beim Polygonzug mit gewöhnlichen Zielweiten von 40- bzw. 80m mit den im Messroboterverfahren zu Grunde liegenden Zielweiten von gleichbleibend 40m durchgeführt, ergeben sich im Messroboterverfahren Genauigkeiten am Endpunkt quer, längs und vertikal zur

Tunnelachse, die besser sind als bei dem in Rede stehenden Polygonzug. Da die Differenz der Werte geringer ist, fallen die Genauigkeitssteigerungen ebenfalls geringer aus, von der Halbachse C abgesehen (Tabelle 7.6).

<b>3 Kopfbalkenprismen</b>				
	(mm)	A	B	C
68 % =	Polygonzug 40/80m	22,11	3,54	0,93
1 Sigma	Messroboter 40m	20,69	3,02	0,58
Genauigkeitssteigerung		<b>6%</b>	<b>15%</b>	<b>38%</b>

Tabelle 7.6: Vergleich des Messroboterverfahrens in 40m-Intervallen mit Polygonzugmessung mit Zielweiten bis 80m

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Messroboterverfahren im Vergleich mit den in kleindimensionierten Tunnelvortrieben angewendeten Polygonzugmessungen zu besseren Genauigkeiten am Durchschlagspunkt führt.

### 7.3 Zuverlässigkeitsmaße für Netzmessungen

Die Prüfung der Zuverlässigkeit einer geplanten Messanordnung soll zeigen, wie gut die Überbestimmung des Netzes ist und wo grobe Messfehler vorliegen (Carosio 2008). Ein Maß für die Messkontrollen ist der Redundanzanteil, der sich wie folgt aufteilen lässt:

Redundanzanteil	Beobachtung
Red. ant. < 0,3	Die Aufdeckung grober Fehler ist kaum möglich. Durch Einführung weiterer Beobachtungen kann das Netz versteift werden.
0,3 < Red. ant. < 0,7	Es besteht eine gute gegenseitige Kontrollierbarkeit der Beobachtungen.
0,7 < Red. ant.	Die Beobachtung ist sehr gut durch andere Beobachtungen kontrolliert.
Red. ant. $\approx$ 1	Eine Beobachtung wird durch andere Beobachtungen vollständig kontrolliert, z. B. kontrollieren genaue Beobachtungen die Ungenauen.

Tabelle 7.7: Einteilung von Redundanzanteilen, PANDA (Programmsystem zur Ausgleichung von geodätischen Netzen und zur Deformationsanalyse) der Firma Geotec (Geodätische Technologien GmbH)

Der Redundanzanteil ist ohne Dimension und liegt, wie zu sehen ist, zwischen 0 und 1. Carosio (2008) führt Zuverlässigkeitsmaße in % auf. Ein Zuverlässigkeitsmaß von 0% liegt bei Messungen vor, die nicht kontrolliert sind, bei 25% liegen genügend kontrollierte Messungen vor. Die Messung ist perfekt kontrolliert, wenn 100% erreicht werden. Weiter führt Carosio (2008) aus, dass die Redundanzanteile bzw. Indikatoren in einem Bereich zwischen 25% und ca. 60% liegen sollten. Die Prozentanteile decken sich gut mit den Angaben aus Tabelle 7.7.

Anhand der Redundanzanteile ist es möglich, Netzschwächen aufzudecken. Daraus kann z. B. folgen, dass übergreifende Distanzen und Richtungen oder in Polygonnetzen Distanzen hin und zurück gemessen werden sollten.

### 7.3.1 Zuverlässigkeitsmaße für die Herablegungsmessung mit 3 und 6 Kopfbalkenprismen

In der Tabelle 7.8 sind die Redundanzanteile für die Herablegungsmessung zum Vergleich mit 3 und 6 Kopfbalkenprismen aufgeführt.

Prismen	Standpunkt	Zielpunkt	Red. ant	Nabla I	Red. ant	Nabla I	Red. ant	Nabla I
				(mgon)		(mgon)		(mm)
			Richtungen		Zenitwinkel		Strecken	
	<b>Herablegung</b>							
3	300000	700001	0.07	4,52	0.55	1,66	0.95	4,22
	300000	700002	0.22	2,64	0.69	1,49	0.95	4,22
	300000	700003	0.05	5,38	0.55	1,67	0.95	4,22
6	300000	700001	0,53	1,7	0,83	1,36	0,98	4,17
	300000	700002	0,46	1,82	0,83	1,36	0,98	4,17
	300000	700003	0,48	1,79	0,84	1,35	0,98	4,17
	300000	700004	0,53	1,69	0,84	1,35	0,98	4,17
	300000	700005	0,56	1,65	0,83	1,35	0,98	4,17
	300000	700006	0,58	1,63	0,83	1,36	0,98	4,17

Tabelle 7.8: Zuverlässigkeitsmaße für die Herablegungsmessungen

Von dem Herablegungspunkt 300000 werden zu den Kopfbalkenprismen nur relativ kurze Strecken gemessen. Die Unsicherheiten bei den Richtungs- und Zenitwinkelbeobachtungen mit Standardabweichungen von je 0,3mgon sind dabei sehr gering. Der Quer- und Höhenfehler  $QH$  steigt linear mit zunehmendem Abstand  $S$  vom Tachymeterstandpunkt.

Nach

$$QH = \frac{S \cdot 0,3}{\rho} \quad (7.3)$$

ergibt sich ein Wert  $QH$  z. B. bei einer 10m-Distanz von 0,05mm. Größere Streckenlängen zwischen dem Tachymeterstandpunkt und den Presswandprismen liegen wegen der klein gehaltenen Pressgrubendurchmesser nicht vor. Eine kurze Zielweite ist rechnerisch wesentlich genauer als lange Zielweiten, woraus folgt, dass die kurze Zielweite durch die längeren nicht kontrolliert wird. Der Redundanzanteil ist dann sehr klein.

Die in den Tabellen aufgeführten Werte Nabla L geben an, wie groß der Fehler einer Beobachtung sein darf, bevor er als grob falsch anzusehen ist. Redundanzanteil und Nabla L bedingen sich wechselseitig, ein kleiner Redundanzanteil bedeutet, dass Nabla L einen größeren Wert hat.

Die Zuverlässigkeitsmaße durch den Anschluss an 6 Kopfbalkenprismen zeigen eine gute gegenseitige Kontrollierbarkeit der Beobachtungen, während die Zuverlässigkeit bei den Anzielungen an 3 Kopfbalkenprismen durch jede Anschlussmessung zu einem weiteren Prisma zunimmt. Aus Genauigkeitsgründen ist eine Anzahl von 6 Prismen nicht erforderlich, wie in Tabelle 7.2 aufgeführt. Die Frage nach einer optimalen Anzahl und Verteilung von Messprismen im Startschacht stellt sich grundsätzlich zu Beginn der Planungen für das Portal- und Vortriebsnetz. Von Vorteil sind neben den gerade genannten Aspekten mehrere Prismen für die Herablegungsmessung, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass das eine oder andere Prisma nicht mehr vorhanden, beschädigt oder auch verschmutzt ist und somit für eine Zielung ausfällt.



### 7.3.2 Zuverlässigkeitsmaße für die Polygonzugmessung

In der Tabelle 7.9 ist der Polygonpunkt 300002 (Abbildung 7.1) beispielhaft für die Betrachtung der Zuverlässigkeiten hervorgehoben (grau hinterlegt).

Der Redundanzanteil für die Richtung liegt bei den geplanten gleichlangen Polygonseiten bei 0, was nach obigen Ausführungen bedeutet, dass diese Beobachtung nicht kontrolliert ist, da keine überschüssigen Beobachtungen vorliegen. Der Zenitwinkel ist ausreichend geprüft, da zwischen den Polygonpunkten eine Winkelmessung im Hin- und Rückblick erfolgt. Damit gibt es eine zusätzliche Zenitwinkelbeobachtung, die zu einem Redundanzanteil von 1 führt, welcher auf die beiden Zenitwinkel gleichmäßig verteilt und in der Tabelle mit einem Redundanzanteil von 0,5 aufgeführt wird. Bei den Streckenmessungen, die ebenfalls im Hin- und Rückblick gemessen werden und als gleichgenau betrachtet werden können, liegen die Redundanzanteile je Beobachtung auch bei 0,5. Der streckenabhängige Fehleranteil von 1,5ppm hat insofern keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis, da die Zielweiten in einem Tunnel mit einem DN1600 relativ kurz sind.

Standpunkt	Zielpunkt	Red. ant	Nabla I	Red. ant	Nabla I	Red. ant	Nabla I
			(mgon)		(mgon)		(mm)
		Richtungen		Zenitwinkel		Strecken	
<b>Polygonzug</b>							
.....							
300001	400000	0.63	1,55	0.77	1,41	0.42	6,38
300001	800000	0.58	1,63	0.77	1,41	0.45	6,15
300001	300000	0.64	1,55	0.72	1,45	0.68	5,02
300001	300002	0.00	9999.99	0.50	1,75	0.50	5,84
300002	300001	0.00	9999.99	0.50	1,75	0.50	5,84
300002	300003	0.00	9999.99	0.50	1,75	0.50	5,84
300003	300002	0.00	9999.99	0.50	1,75	0.50	5,84
300003	300004	0.00	9999.99	0.50	1,75	0.50	5,84
.....							

Tabelle 7.9: Zuverlässigkeitsmaße für die Polygonzugmessung, 40m-Intervall

### 7.3.3 Zuverlässigkeitsmaße für das Messroboterverfahren

Wie in der vorstehenden Tabelle 7.9 der Polygonpunkt 300002 für die Beurteilung der Zuverlässigkeiten hervorgehoben wurde, ist der Messroboterstandpunkt 300002 (Abbildung 7.2) beispielhaft für alle anderen Standpunkte in der Tabelle 7.10 farblich kenntlich gemacht.

Wie im Kapitel 6.9 „Messungen innerhalb der Messpunktfelder“ erläutert, steht der Messroboter 4m vor dem Prismenring. Die kurze Zielweite ist rechnerisch wesentlich genauer als lange Zielweiten, woraus folgt, dass wie schon im Kapitel 7.3.1 aufgeführt, die kurze Zielweite durch die längeren, d. h. die Strecken zu den davor- und dahinter positionierten Prismen nicht kontrolliert wird. Der Redundanzanteil ist dann sehr klein. Die Beobachtungen der weiter entfernten Doppelprismen sind gut gegenseitig kontrolliert.

## 7.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Werten aus der Praxis

Standpunkt	Zielpunkt	Red. ant	Nabla I	Red. ant	Nabla I	Red. ant	Nabla I
			(mgon)		(mgon)		(mm)
		Richtungen		Zenitwinkel		Strecken	
<b>Messroboter</b>							
.....							
300001	400000	0.44	0,92	0.73	0,71	0.40	3,22
300001	800000	0.44	0,92	0.73	0,71	0.42	3,14
300001	400001	0.01	7,38	0.01	6,06	0.69	2,44
300001	800001	0.01	7,38	0.01	6,07	0.69	2,44
300001	400002	0.45	0,91	0.71	0,72	0.56	2,72
300001	800002	0.45	0,91	0.71	0,72	0.56	2,72
300002	400001	0.41	0,96	0.56	0,81	0.58	2,67
300002	800001	0.41	0,96	0.56	0,81	0.58	2,67
300002	400002	0.01	6,93	0.01	5,58	0.71	2,42
300002	800002	0.01	6,94	0.01	5,58	0.71	2,42
300002	400003	0.45	0,91	0.71	0,72	0.56	2,72
300002	800003	0.45	0,91	0.71	0,72	0.56	2,72
.....							

Tabelle 7.10: Zuverlässigkeitsmaße für das Messroboterverfahren, 40m-Intervall

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Beobachtungen besonders bei den Richtungsmessungen im Messroboterverfahren entsprechend der Einteilung gemäß Tabelle 7.7 besser kontrolliert sind als beim Polygonzugverfahren.

## 7.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Werten aus der Praxis

Die Simulationsberechnungsergebnisse können von den tatsächlich zu erreichenden Ergebnissen abweichen, bedingt durch die schon beschriebenen Auswirkungen durch Refractionen im Startschacht und im Tunnel selber. Im Tunnel können die Vortriebskontrollvermessungsergebnisse z. B. durch Wärmebrücken, besonders an Zwischendehnerstationen, verfälscht werden. Ebenso ergeben sich bei der Herablegungsmessung z. B. wetterbedingt nicht immer die gleichen Verhältnisse.

Die in der Tabelle 7.5 zusammengestellten Ergebnisse der Fehlerellipsen für den Messroboter können durch Praxistests überprüft werden.

In mehreren Messkampagnen wurden Messprismen in einen Tunnel montiert, die mit horizontiertem Tachymeter eingemessen und als Nullmessung bzw. Bezugssystem koordiniert wurden. Anschließend sind die Prismen in beschriebener Weise zu Messpunktfeldern zusammengefasst und jeweils in Schrägstellung eingemessen worden. Ein Berechnungsbeispiel mit Restklaffenermittlung ist in der Tabelle 7.11 zu sehen.

Pro Messroboterstandpunkt ergibt sich ein eigenes Koordinatensystem, welches ähnliche Werte hat, da die Messfelder die gleiche Anzahl von Prismen und gleiche Koordinatenursprungswerte haben.

Schrägsystem $S_{(m)}$				Vortriebsnetz $VTN_{(m)}$			Restklaffen $Rk_{(m)}$		
$Y_S$	$X_S$	$Z_S$	Prisma	$Y_{VTN}$	$X_{VTN}$	$Z_{VTN}$	$Y_{Rk}$	$X_{Rk}$	$Z_{Rk}$
999,715	973,076	100,573	1	1999,278	2003,401	100,975	0,001	0,000	0,000
1000,985	973,082	100,609	2	2000,547	2003,411	100,997	-0,001	0,000	0,000
999,306	1003,403	101,089	3	1998,780	2033,733	100,948	0,000	0,000	0,000
1000,526	1003,425	101,082	4	2000,000	2033,759	100,924	0,000	0,000	0,000
998,791	1033,753	101,555	5	1998,176	2064,088	100,869			
1000,000	1033,751	101,590	6	1999,386	2064,090	100,891			
999,784	973,042	100,391	3	1998,780	2033,733	100,948	0,002	0,000	0,000
1001,006	973,063	100,348	4	2000,000	2033,759	100,924	-0,002	0,000	0,000
999,323	1003,386	101,111	5	1998,176	2064,088	100,869	0,000	0,000	0,000
1000,532	1003,382	101,113	6	1999,386	2064,090	100,891	0,000	0,000	0,000
998,784	1042,803	102,103	7	1997,453	2103,521	100,825			
1000,000	1042,813	102,091	8	1998,669	2103,537	100,833			
999,826	963,949	99,804	5	1998,176	2064,088	100,869	0,001	0,000	0,000
1001,037	963,945	99,799	6	1999,386	2064,090	100,891	-0,001	0,000	0,000
999,321	1003,354	101,139	7	1997,453	2103,521	100,825	0,000	0,000	0,000
1000,537	1003,364	101,121	8	1998,669	2103,537	100,833	0,000	0,000	0,000
998,873	1042,766	102,515	9	1996,786	2142,963	100,823			
1000,000	1042,784	102,465	10	1997,914	2142,986	100,797			

Tabelle 7.11: Berechnungsbeispiel Koordinatentransformation und Restklaffen-  
ermittlung, Testmessungen Emschergenossenschaft

Entsprechend der Abbildung 6.64 werden die ersten vier Messprismen zu identischen Punkten gewählt. Mit diesen wird die Transformation durchgeführt. Das Vortriebsnetz  $VTN$  ist das Zielsystem. Das erste Zielsystem entsteht durch die Einmessung der Pressenwiderlagerprismen 1 und 2 und des ersten Prismenringes entsprechend der Abbildung 6.2.2 mittels horizontiertem Tachymeter im Portalnetz. In der Abbildung 6.2.3 misst das Tachymeter auf dem Roboter erneut die gleichen Prismen ein und zusätzlich die Prismen des nächsten Prismenringes. Bei der Transformation ergeben sich bei den identischen Punkten (Passpunkte) nur geringe Restklaffen  $Rk$  in einer Größenordnung bis 2mm. Nach den standpunktweisen aneinander gereihten Koordinatentransformationen liegen die Koordinaten aller Messprismen im Vortriebsnetz vor.

In der Tabelle 7.12 sind die Ergebnisse der Beispielmessung aus der Tabelle 7.11 eingetragen. Der Vergleich zwischen der horizontierten Nullmessung und dem transformierten Schrägsystem, welches nunmehr mit den Koordinaten im Vortriebsnetz vorliegt, zeigt eine Querabweichung  $\Delta Y$  in einer Größe von 5,8mm bei einer Messstrecke von 260m in diesem Beispiel. Der Längsfehler  $\Delta X$  ist mit 0,3mm sehr gering, während der Höhenfehler  $\Delta Z$  eine ähnliche Größe wie der Querfehler aufweist.

Unter der Annahme, dass sich die Fehler bei einer Gesamtvortriebslänge von 1.200m in gleicher Größenordnung weiterentwickeln würden, wäre bei einer Aufsummierung eine Gesamtquerabweichung von ca. 30mm möglich. Der Höhenfehler würde bei gleicher Fortsetzung eine Größenordnung von ca. 25mm ergeben. Der Längsfehler liegt bei ca. 15mm. Wie schon im Kapitel 6.18 „Überführung der Tachymeterkoordinaten in das Vortriebsnetz“ erwähnt, betragen die maximal vertraglich zulässigen Abweichungen im Projekt „Umbau des Emschersystems“ horizontal  $\pm 100\text{mm}$  für die Lage und vertikal  $\pm 50\text{mm}$  in der Höhe.

	Nullmessung horizontiertes Vortriebsnetz			"Schrägsystem" transformiert in das Vortriebsnetz			Differenzen zur Nullmessg.		
	Y	X	Z	Y	X	Z	$\Delta Y_{mm}$	$\Delta X_{mm}$	$\Delta Z_{mm}$
1	1999,2776	2003,4007	100,9752	1999,2776	2003,4007	100,9752	Passpunkte		
2	2000,5470	2003,4108	100,9969	2000,5470	2003,4108	100,9969			
3	1998,7804	2033,7330	100,9477	1998,7804	2033,7330	100,9477			
4	2000,0000	2033,7586	100,9245	2000,0000	2033,7586	100,9245			
5	1998,1759	2064,0881	100,8691	1998,1761	2064,0881	100,8695	-0,2	0,0	-0,4
6	1999,3856	2064,0902	100,8903	1999,3858	2064,0903	100,8905	-0,2	-0,1	-0,2
7	1997,4520	2103,5209	100,8236	1997,4527	2103,5210	100,8250	-0,7	-0,1	-1,4
8	1998,6686	2103,5367	100,8324	1998,6693	2103,5368	100,8326	-0,7	-0,1	-0,2
9	1996,7842	2142,9631	100,8207	1996,7858	2142,9632	100,8228	-1,6	-0,1	-2,0
10	1997,9123	2142,9857	100,7956	1997,9139	2142,9857	100,7967	-1,6	0,0	-1,1
11	1996,0068	2182,4163	100,7817	1996,0097	2182,4165	100,7850	-2,9	-0,2	-3,3
12	1997,1451	2182,4382	100,7786	1997,1480	2182,4384	100,7807	-2,9	-0,2	-2,1
13	1995,2795	2221,8910	100,7673	1995,2840	2221,8912	100,7723	-4,5	-0,2	-5,0
14	1996,4131	2221,9099	100,7413	1996,4174	2221,9103	100,7448	-4,3	-0,4	-3,5
15	1994,5288	2262,8665	100,6959	1994,5355	2262,8669	100,7019	-6,7	-0,4	-6,0
16	1995,6753	2262,8900	100,6785	1995,6811	2262,8903	100,6836	-5,8	-0,3	-5,1

Tabelle 7.12: Differenzbildung zwischen Soll- und transformiertem System (Vortriebsnetzkoordinaten)  
Beispielmessungen, Emschergenossenschaft

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass das autonome Messverfahren eine Alternative zu den herkömmlichen Vortriebskontrollvermessungen ist.

### 8. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die autonome Vortriebskontrolle

In den vorstehenden Kapiteln wurden die Verfahrensschritte beschrieben, die erforderlich sind, um eine autonome Rohrvortriebskontrollvermessung mit einem Messroboter durchführen zu können. Diese dient dazu, die Wirtschaftlichkeit durch die Entwicklung neuer Messverfahren gegenüber heutigen herkömmlichen Verfahren zu steigern und damit die Vortriebsleistung pro Zeiteinheit (m/d) zu erhöhen.

Die Vortriebsleistung ist die entscheidende Größe im Tunnelbau. Hierfür ist eine möglichst genaue Prognose der Vortriebsgeschwindigkeit von Bedeutung, die Einfluss auf die Angebotskalkulation hat. Die eingerechneten Vortriebsgeschwindigkeiten differieren in den Angeboten teilweise erheblich. Im Interesse einer effizienten Vortriebsleistung sind durch SCHNEIDER ET. AL (2010) Untersuchungen durchgeführt worden, um diesen Zustand zu verifizieren. Hierfür werden Zusammenhänge zwischen einer gegebenen Geologie und der Bohrkopfumdrehung, ausgedrückt in mm Vortrieb pro Bohrkopfumdrehung, hergestellt. Des Weiteren werden die Behinderungen, Störungen und Unterbrechungen des Bohrbetriebs aufgeführt, die zu Stillstandszeiten führen. Zusätzlich ist die Vortriebszeit, d. h. die zur Verfügung stehende Arbeitszeit in die Berechnung der Vortriebsleistungen einzubeziehen. Je nach Arbeitszeitmodell variieren die Vortriebszeiten. Sie können auch im Rahmen von Genehmigungsverfahren festgelegt bzw. vorgegeben werden.

#### 8.1 Zeiten und Kosten bei herkömmlichen Rohrvortriebskontrollvermessungen

Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen Vergleich zwischen der Messroboterkontrollvermessung und der Polygonzugmessung erfordert zuerst die Kenntnis der Zeiten und Kosten einer herkömmlichen Kontrollvermessung.

Auf Grundlage der gemachten Erfahrungen in der Baumaßnahme Abwasserkanal Emscher und in den Tunnelbauprojekten der Nebeneinzugsgebiete (Abbildung 2.2) ergeben sich Ausgangsparameter für eine Kostenermittlung für die herkömmlichen Kontrollvermessungen.

Wie schon beschrieben, spielt der Rohrdurchmesser eine wesentliche Rolle bei der Durchführung von Vortriebskontrollvermessungen. Je geringer der Durchmesser ist, desto mehr Zeit ist für eine Vermessung einzuplanen. Entscheidend für den Zeitbedarf einer Kontrollvermessung sind auch die Trassierungselemente. Kurze Geraden, lange Bögen, kleine Radien und diese in S-Kurven geplant, bedeuten eine Einschränkung der Sichtweiten zwischen den Polygonpunkten im Vortriebsnetz, was zwangsläufig zu einer höheren Anzahl von Tachymeterstandpunkten führt. Die Wahl des Vortriebsverfahrens hat ebenfalls einen Einfluss auf die Vermessungszeiten. Eine Vermessung z. B. in Rohrhaltungen, wo die Loren auf Gleisen geführt werden ist zeitaufwendiger durch die eingeschränkte Begehrbarkeit. Wärmeentwicklungen jedweder Art können zu Refraktionen führen, auf die bei der Kontrollvermessung Rücksicht genommen werden muss. Dann sind die Sichten zwischen den Polygonpunkten gegebenenfalls kürzer herzustellen, was die Messzeiten erhöht. Es fließen auch die Zeiten ein, die sich z. B. dadurch ergeben können, wenn Stative jedes Mal für eine Kontrollvermessung mitgeführt werden müssen, weil eine Lagerung im Seitenbereich des Rohrstrangs je nach Vortriebsverfahren nicht möglich ist.

Für eine Kostenermittlung werden in nachfolgender Tabelle 8.1 als Beispiel Bezugsgrößen für einen Rohrdurchmesser von DN1600 und eine Vortriebslänge von 600m eingeführt. Bezogen auf diese Werte werden Messzeiten für die in 40m-Messintervallen durchzuführenden Auftragnehmermessungen ermittelt. Der Auftraggeber führt wie im Kapitel 4.2 „Rohrvortriebskontrollvermessungen im Emscherprojekt“ aufgeführt nach 40m und danach alle 200m eine Kontrollvermessung durch. Wie im Kapitel 7 „Die Messverfahren im Vergleich mittels Simulationsberechnungen“ beschrieben, liegen die Zielweiten im Messroboterverfahren bei 40m und bei Polygonzugmessungen auch zwischen 40- und 80m. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung fließen deshalb gemittelte Zielweiten von 60m ein. Daraus resultieren bis zu 10 Aufstellungen, für die wegen der zuvor genannten Einschränkungen ca. 4 Stunden Messzeiten (rechnerisch 25 Minuten pro Standpunkt) angesetzt werden.

## 8.2 Zeiten der autonomen Rohrvortriebskontrollvermessung

Die Kostenschätzung wurde für die Kontrollvermessungen beider Vertragsparteien erstellt. Wie im Kapitel 4.2 beschrieben, ist die Anzahl der Kontrollvermessungen unterschiedlich. Im Projekt Emscherumbau ergeben sich bis zu 4 Auftraggeber- und bis zu 15 Auftragnehmermessungen. Werden alle Messzeiten addiert, ergibt sich eine Gesamtmesszeit von ca. 45 Stunden. Mit einem angenommenen Stundensatz von 120€ pro Stunde für einen 2-Mann-Messtrupp ergeben sich Gesamtkosten von ca. 6.500€ brutto. Die Zeiten und Kosten für die Anschlussmessungen aus dem Grundlagen- und Portalnetz inklusiv der Herablegungsmessungen sind hier nicht inbegriffen, weil diese unabhängig von der Wahl der eigentlichen Rohrvortriebskontrollvermessungen sind. Diese vorlaufenden Vermessungsarbeiten sind für alle Messverfahren gleich.

AUSGANGSPARAMETER														
DN 1600														
Vortriebslänge	Standpunkte				Messzeit		4x Auftraggebermessung							
600m	bis 10				ca. 4 Std		15x Auftragnehmermessung							
Vortriebslänge in Metern														
40	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600
Aufstellungen														
1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10
Messzeit in Minuten														
25	50	50	75	100	100	125	150	150	175	200	200	225	250	250

Gesamtmesszeit AG und AN

45 Stunden

Tabelle 8.1: Vermessungszeiten für herkömmliche Rohrvortriebskontrollen

## 8.2 Zeiten der autonomen Rohrvortriebskontrollvermessung

Im Gegensatz zu den Zeiten der herkömmlichen, manuell durchzuführenden Kontrollvermessungen können die Zeiten einer Kontrollvermessung mit dem Messroboter besser berechnet werden. Der Faktor „Mensch“ scheidet hier aus. Die Gesamtmesszeit setzt sich mit den einzelnen unten genannten Parametern zusammen.

Die ersten Zeiten betrifft die Projektdateneingabe, welche z. B. die Haltungsnummer, den Solldurchmesser und die vorberechneten Näherungskordinaten der Messprismen beinhalten. Entsprechend Kapitel 6.7.4 ist vor der eigentlichen Messfahrt eine Kalibrierung durchzuführen, wofür Zeiten einzuplanen sind.

Ein größerer Zeitfaktor resultiert aus der reinen Fahrzeit des Messroboters im Hin- und Rückweg. Der Roboter soll mit einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 6km/h die Haltung durchfahren, wobei eine Gesamtstrecke von 2x der Haltungslänge zurückgelegt werden muss.

Die Zeiten, die sich aus der Anfahrverzögerung und der Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit bei Annäherung zum Messroboterstandpunkt ergeben, werden pauschal mit 0,5 Minuten berücksichtigt. Nach dem Messvorgang startet der Roboter nicht sofort mit 6km/h. Die Fahrgeschwindigkeit wird von 0 km/h auf die Endgeschwindigkeit von 6 km/h hochgefahren und vor dem nächsten Halt von 6 km/h so auf 0 km/h reduziert, dass die vorberechnete Position 4m vor einem Prismenring eingenommen werden kann.

Am Messroboterstandpunkt fallen jeweils Zeiten für die Suche der 6 Prismen und deren Einmessungen an. Wie in der Vermessung bekannt, werden Messpunkte in einem Vollsatz gemessen, um Instrumentenfehler zu eliminieren. Bei einem Vollsatz werden die Zielpunkte der Reihe nach in der ersten Fernrohrlage gemessen, um nach Durchschlag des Fernrohres in umgekehrter Reihenfolge die gleichen Messpunkte in der zweiten Fernrohrlage zu erfassen.



Dieser Vorgang benötigt für die sechs Doppelprismen ca. 80 Sekunden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den jeweiligen Messpunkt nach der Messung in Fernrohrlage 1 direkt in der zweiten Fernrohrlage einzumessen. Dafür werden für die 6 Prismen ca. 120 Sekunden Zeit benötigt.

Die Zeiten für die Prismensuche sind davon abhängig, wie schnell die Prismen angezielt werden können, was in erster Linie für das Prisma 3 von Wichtigkeit ist. Ist dieses gefunden und eingemessen, können durch die Absteckelemente alle anderen Doppelprismen erfasst werden. Eine Suchzeit von 0,5 Minuten je Roboterstandpunkt liegt der Messzeitenberechnung zu Grunde.

Vortriebslänge in 40m-Intervallen	Anzahl Roboterstandpunkte	Eingaben von Projektdaten	In-situ Kalibrierung je Kontrollvermessung	Fahrzeit Hin- und Rückweg 6 km/h	Anfahrverzögerung/Geschwindigkeitsreduktion	Tachymetermesszeit pro Standpunkt	Gesamte Tachymetermesszeit je Kontrollvermessung	Prismensuche pro Standpunkt	Dauer je Kontrollvermessung
		Min	Min	Min	Min	Sec	Min	Min	Min
600	15	5	5	11	7,5	80	20	7,5	56
560	14	5	5	11	7	80	19	7	54
520	13	5	5	10	6,5	80	18	6,5	51
480	12	5	5	9	6	80	16	6	49
440	11	5	5	8	5,5	80	15	5,5	44
400	10	5	5	7	5	80	14	5	41
360	9	5	5	7	4,5	80	12	4,5	38
320	8	5	5	6	4	80	11	4	35
280	7	5	5	5	3,5	80	10	3,5	32
240	6	5	5	4	3	80	8	3	28
200	5	5	5	3	2,5	80	7	2,5	25
160	4	5	5	3	2	80	6	2	23
120	3	5	5	2	1,5	80	4	1,5	19
80	2	5	5	1	1	80	3	1	16
40	1	5	5	0	0,5	80	1	0,5	12

Tabelle 8.2: Gesamtmesszeit für eine 600m-Haltung in **Stunden: 9**

Die Kontrollvermessungszeiten bei einer Vortriebslänge von 600m setzen sich folgt zusammen:

- |  |                        |
|--|------------------------|
| 1. Zeiten für die Eingaben von Projektdaten wie Haltungsnummer und Näherungskkoordinaten der Messprismen | ca. 5 Minuten          |
| 2. Zeiten für die In-situ Kalibrierung   | ca. 5 Minuten          |
| 3. Fahrzeit mit 6km/h für 2*560m, Hin- und Rückweg   | ca. 11 Minuten         |
| 4. Zeiten für Anfahrverzögerung und Geschwindigkeitsreduzierung für 15 Standpunkte á 1/2 Minute          | ca. 7,5 Minuten        |
| 5. Tachymetermesszeiten für 15 Standpunkte á 80 Sekunden und Tachymetergesamtmesszeiten                  | ca. 20 Minuten         |
| 6. Prismensuchzeiten für 15 Standpunkte á 0,5 Minuten  | <u>ca. 7,5 Minuten</u> |

Summe ca. 56 Minuten

Mit jeder kürzer werdenden Vortriebslänge (560, 520, 480 usw.) verringern sich die Gesamtmesszeiten. Konstant für jede Messroboterfahrt bleiben die Eingangswerte 1 und 2 mit jeweils 5 Minuten. Alle anderen Parameter sind abhängig von der Vortriebslänge. Die Gesamtmesszeit für alle Roboterstandpunkte beträgt 9 Stunden für eine 600m-Haltung.

### 8.3 Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Mit Vorliegen der Zeiten und Kosten für die herkömmlichen und der Zeiten für die autonomen Rohrvortriebskontrollvermessungen kann für den 600m-Vortrieb eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen, um den Mehrwert des autonomen Messverfahrens darzustellen. Unterschiedliche Parameter sind als Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

1. Messroboterzeiten,
2. Vortriebstagesleistungen,
3. Arbeitszeiten der Vortriebsmannschaften und
4. Vortriebskosten pro Meter in Verbindung mit den Rohrdurchmessern.

Für Vergleichsrechnungen werden die Messzeiten der herkömmlichen Kontrollvermessungen (Tabelle 8.1) mit aufgeführten 45 Stunden in Beziehung zu den Messroboterzeiten (Tabelle 8.2) von 9 Stunden gesetzt. Die Differenz ergibt sich zu 36 Stunden, der Zeitersparnis zwischen beiden Messverfahren. Sie ist die erste Bezugsgröße für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Tabelle 8.3. Für die Berechnungen ergibt sich ein Bruttowert von ca. 5.150€ auf Basis der Messtruppkosten mit genannten 120€ pro Stunde.

Die Vortriebstagesleistungen sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Die Boden- bzw. Baugrundverhältnisse, gekennzeichnet durch Bodenklassen, haben einen großen Einfluss auf die Vortriebsleistungen. Darauf wird das Vortriebsverfahren mit der entsprechenden Vortriebsmaschine abgestimmt (Kapitel 2.2). Daraus folgt eine Vortriebsleistung in Meter pro Tag in Abhängigkeit von der täglichen Arbeitszeit. Die in der Tabelle 8.3 aufgeführten Vortriebsmeter beginnen mit 10m/Tag und enden bei einer Tagesleistung von 20m. Diese Tagesleistungen werden in laufenden Vortriebsprojekten der Emschergenossenschaft erreicht. Begünstigt werden höhere Tagesleistungen, wenn homogene Bodenverhältnisse vorherrschen. Unberücksichtigt auf die Tagesvortriebsleistung bleibt die nicht monetär zu erfassende Erfahrung der Vortriebsmannschaft, insbesondere des Maschinenführers, der für die an die jeweilige Situation anzupassende Vortriebsgeschwindigkeit auch für einen zielgerichteten Vortrieb in den vorgegebenen Toleranzen verantwortlich ist.

Wie oben erwähnt, variieren die Arbeitszeiten der Vortriebsmannschaften. Der Vortrieb kann im Einschichtbetrieb mit 8 Stunden bis zu den 24h im Mehrschichtbetrieb erfolgen.

Innerhalb dieses Korridors können die Vortriebsarbeiten z. B. auch in einem 10/4-System durchgeführt werden. Hierunter ist zu verstehen, dass die Mannschaft 10 Tage hintereinander den Vortrieb durchführt und anschließend 4 Tage arbeitsfrei hat. Innerhalb der 10 Tage verteilen sich dann die täglichen Arbeitsstunden, die von den Baufirmen unterschiedlich in den Angeboten angesetzt werden. Hieraus lässt sich keine für eine Wirtschaftlichkeitsberechnung eindeutige Stundenanzahl generieren, zumal auch Zeiten für Wartungsarbeiten eingeplant werden. Für die Berechnungen der Gesamteinsparungen der Vortriebskosten durch den Messrobotereinsatz wird eine tägliche Anzahl von 13 Stunden in der Tabelle 8.3 eingeführt.

Die Vortriebskosten werden in den Angeboten der Baufirmen in € / m angegeben, wobei die verschiedenen Rohrdurchmesser bei der Preisgestaltung ebenso Berücksichtigung finden wie die Vortriebsgeschwindigkeiten. Die in der untenstehenden Tabelle eingetragenen € - Beträge pro Meter resultieren als Mittelwerte aus einer Vielzahl von Baufirmenangeboten der letzten Jahre für Vortriebsprojekte der Emschergenossenschaft.

Für die Einsparungen der Vortriebskosten werden folgende Ausgangsparameter angesetzt:

1. Vortriebslänge von 600m
2. Tagesvortriebsleistung in Meter pro Tag (m/d)
3. Zeitersparnis von 36 Stunden
4. Arbeitszeit in Stunden pro Tag (Std/d)
5. Rohrdurchmesser von DN 1600 – DN 2000
6. Vortriebskosten pro Meter (€/m)
7. Einsparung von Vermessungskosten

Tages- leistung Vortrieb in  m	Gesamt- dauer Vortrieb in  d	Arbeits- zeit in Std / d 13	DN 1600	DN 1800	DN 2000				
			Vortriebskosten / m			Einsparung Vermessungszeit 36 Stunden			
			1300 €/m*	1450 €/m*	1550 €/m*	Einsparung Vermessungskosten 5.150 €			
			* Angebot						
Vortriebslänge 600 m		Gesamt- stunden	780.000	870.000	930.000	DN 1600	DN 1800	DN 2000	% Zeit
			Gesamtkosten €						
			Vortriebskosten / h			Einsparung je Vortrieb in €			
10	60	780	1000	1.115	1.192	47.990	52.933	56.228	5
12	50	650	1200	1.338	1.431	56.558	62.490	66.444	6
15	40	520	1500	1.673	1.788	69.410	76.825	81.768	7
18	33	433	1800	2.008	2.146	82.262	91.160	97.091	8
20	30	390	2000	2.231	2.385	90.830	100.716	107.307	9
						69.410	76.825	81.768	7
							76.000		7

Die Berechnungen im Einzelnen:

- Mit der Haltungslänge von 600m und den jeweiligen Tagesvortriebsleistungen von 10 – 20m pro Tag werden die Gesamtvortriebszeiten in Tagen berechnet.
- Die pauschalierte tägliche Arbeitszeit von 13 Stunden wird multipliziert mit der Anzahl der Gesamttage für den Vortrieb und ergibt die Gesamtstunden für den Vortrieb.
- Die Gesamtkosten für die Vortriebsarbeiten ergeben sich aus dem Produkt der Haltungslänge und den Vortriebskosten pro Meter.
- Die Vortriebskosten einer Stunde werden aus den Gesamtkosten des Vortriebes und den Gesamtstunden berechnet.
- Mit der Zeitersparnis von 36 Stunden werden die Einsparungen der jeweiligen Haltungen in Abhängigkeit der Rohrdurchmesser mit den einzelnen Vortriebskosten einer Stunde inklusiv der Mehrwertsteuer multipliziert.
- Zu diesem Wert werden die eingesparten Vermessungskosten eines Messtrupps mit dem Festbetrag von 5.150€ hinzugerechnet.
- Die Einsparsummen werden pro Rohrdurchmesser als Mittelwert aufgeführt.
- Die drei Mittelwerte werden abermals gemittelt und ergeben die Einsparsumme über alle vorgegebenen Parameter.
- Die Zeitersparnis berechnet sich prozentual aus den Werten 36 Stunden und der Gesamtvortriebszeit in Abhängigkeit der Tagesvortriebsleistung und des Rohrdurchmessers.

Als Ergebnis der gesamten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergibt sich eine Kosteneinsparung gegenüber herkömmlichen Rohrvortriebskontrollvermessungen durch den Einsatz des autonomen Messrobotersystems von ca.

**76.000 €**

und eine Zeitersparnis von ca.

**7 %**

Wie zuvor angemerkt, ist die eingesparte Summe über alle Parameter ermittelt. Durch die differenzierte Auflistung können pro Rohrdurchmesser und Tagesvortriebsleistungen auch einzelne separate Einsparsummen aus der Tabelle abgelesen werden. Die Kosten- und Zeitersparnisse sind, wie angeführt, abhängig von den Kosten pro Meter Vortrieb, die einen wesentlichen Einfluss auf die Einsparsumme haben.

Durch die eingesparte Vortriebszeit kann die Vortriebsmaschine in einem nächsten Vortrieb früher eingesetzt werden. Bei einer verkürzten Vortriebszeit können nachfolgende Gewerke wie der Schachtbau in den Start- und Zielgruben ebenfalls früher beginnen.

Zu den nicht monetären Einsparungen gehört wie in den vorherigen Kapiteln immer wieder erwähnt, die Beachtung der Vorschriften aus dem Arbeits- und Gesundheitsschutz. Mit dem Messrobotersystem ist ein Begehen in Rohrsträngen nicht mehr erforderlich. Die körperlichen Belastungen sind in kleindimensionierten Rohren somit eliminiert.

### 9. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde beschrieben, dass es zu den herkömmlichen Rohrvortriebskontrollvermessungen Alternativen durch die Entwicklung automatisierter Messverfahren gibt. Die Neuentwicklungen haben alle zum Ziel, die Zeiten einer herkömmlichen Kontrollvermessung zu reduzieren und dadurch die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Dadurch können auch Aspekte des Gesundheitsschutzes berücksichtigt werden. Eine Verkürzung der Messzeiten führt gleichzeitig zu einer Verringerung der Baustillstandszeiten. Folglich kann die Vortriebsleistung pro Tag bzw. Zeiteinheit gesteigert werden. Der Schwerpunkt der Arbeit lag dabei auf der Entwicklung eines autonom fahrenden und messenden Roboters.

Das Projekt „Umbau des Emschersystems“ als Auslöser für die Entwicklung automatisierter Messverfahren für Vortriebskontrollen wurde im Kapitel 2 vorgestellt. Die Abwasserkanäle werden auf Grund der Tiefenlage im Vortriebsverfahren erstellt. Die offene Bauweise findet keine Anwendung. Die Rohrvortriebstechnik wurde beschrieben und der Unterschied zur Vortriebstechnik in Tübbingbauweise erläutert. Neben der richtigen Wahl der Vortriebs-technik ist die Wahl der Tunnelvortriebsmaschine ein entscheidender Faktor für einen regelkonformen Vortrieb. Eine Einteilung zeigt informativ die verschiedenen Arten von Vortriebsmaschinen.

Das dritte Kapitel thematisiert die Beteiligung der Ingenieurgeodäsie in Tunnelbauprojekten. Die Grundlagen für die Erstellung von Planungsunterlagen, die sich auf amtliche Lage- und Höhensysteme beziehen, wurden dargestellt. Das amtliche Kataster und das Messpunktfeld wurden durch den Steinkohlenbergbau großen Verwerfungen in Lage und Höhe ausgesetzt, worauf die Messverfahren ständig anzupassen sind. Die sich daraus ergebende Lage- und Höhenproblematik im Hinblick auf ein langgestrecktes Tunnelbauprojekt wurde beschrieben. Die für die Vortriebskontrollvermessungen notwendigen Vermessungsnetze sind dargestellt worden. Die Methoden der Netzkonzeption wurden anhand unterschiedlicher Grundlagennetze dargestellt. Die Besonderheiten bei der Anlage von Grundlagennetzen im Projekt Abwasserkanal Emscher sind erläutert worden. Die Übertragung der oberirdischen 3D-Anschlusspunkte aus dem Portalnetz in die Startbaugrube erfolgt durch Lotungsverfahren oder durch ein- und gegenseitige Visuren. Die unterschiedlichen Herablegungsmöglichkeiten wurden erklärt. Für das Vortriebsnetz sind verschiedene Varianten vorgestellt worden. Die ungünstigen atmosphärischen Bedingungen im Tunnel führen zu Horizontal- und Vertikalrefraktionen. Die Möglichkeiten zur Reduzierung wurden thematisiert. Das Kapitel 3 endet mit der Beschreibung des für die Vortriebsnetze notwendigen Aufbaus von Vermessungspunkten im Rohrstrang.

Den Rohrvortriebskontrollvermessungen ist das Kapitel 4 gewidmet. Hierbei handelt es sich um die Überprüfung der richtigen Lage und Höhe der Tunnelvortriebmaschine. Die möglichen Abweichungen zur Sollachse führen zu Korrekturwerten für das Navigationssystem, welches für die Vortriebsmaschinensteuerung erforderlich ist. Die Verbindung des Navigationssystems zum Vortriebsnetz durch herkömmliche Kontrollvermessungen wurde beschrieben. Je nach Navigationssystem ergeben sich unterschiedliche Kontrollmessintervalle. Die Anzahl der Intervalle hat einen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Vortriebs. Die verschiedenen Navigationssysteme sowie die Kontrollmessintervalle im Emscherprojekt wurden beschrieben.

Im Kapitel 5 wurden die neuen Kontrollmessverfahren vorgestellt. Alle Verfahren haben zum Ziel, die Strecken zwischen den Tachymeterstandpunkten möglichst schnell und gesundheitsschonend zu überbrücken, was durch den Einsatz von Fahrzeugen realisierbar ist und zu einer Verkürzung der Gesamtmesszeiten führt. Für alle Verfahren ist das Mindestlichtmaß für Rohrvortriebe eine zwingend einzuhaltende Größe, die anhand der berufsgenossenschaftlichen Regelungen aufgezeigt wurde. Das erste neue Verfahren mit Messfahrzeugen, in denen das Messpersonal den Rohrstrang sitzend durchfährt, wurde mit den im

Messkonzept vorgesehenen Spannringen, an denen verschiebbare Konsolen montiert sind, beschrieben. Die Vorgehensweise bei der Ermittlung von Vergleichsstationen zwecks Kontrolle und Überprüfung der Kontrollvermessung wurde vorgestellt. Verschwenkbare Konsolen konnten als Alternativen zu den verschiebbaren Konsolen aufgezeigt werden, um den freien Tunnelquerschnitt für jede Vortriebsart möglichst groß zu halten. Daran anschließend wurde die Weiterentwicklung des ersten Messverfahrens zu einem voll portablen Messsystem erklärt. Das Messverfahren benötigt keinen Einbau von Spannringen und Konsolen, da sich alle Messgeräte und Messinstrumente auf den Messfahrzeugen befinden. In der Beschreibung des Messablaufs wird auch die Positionierung der Tachymeter und Messprismen durch temporäre Messpunkte beschrieben.

Im Kapitel 6 wird der Messablauf für die autonome Rohrvortriebskontrollvermessung mittels Messroboter erläutert. Daran anschließend erfolgt die Beschreibung des Roboters, der als Trägerplattform für das Tachymeter inklusiv des Dreifußes ein wesentlicher Bestandteil im autonomen Messkonzept ist. Das für das Messverfahren notwendige Vortriebsnetz wurde ausführlich erläutert. Ein weiterer wichtiger Bestandteil des Messkonzeptes betrifft die Messprismen. Übliche Prismen, die für die manuelle Ausrichtung auf das Tachymeter konzipiert sind, können nicht eingesetzt werden. Ausführlich wurden die Anforderungen an Doppelprismen beschrieben. Die Steuerung des Roboters erfolgt durch Sensoren, deren Spezifikationen und Aufgaben im weiteren Verlauf beschrieben wurden.

Für das Umsetzen des Messkonzeptes wurden die vorbereitenden Aufgaben erläutert, die durchzuführen sind, um die Näherungskordinaten der Messprismen und die Koordinaten der Rohrsohlenpunkte an den Prismenstationen sowie die Zielweiten zwischen Tachymeter und Messprismen berechnen zu können. Anschließend erfolgt die Beschreibung für die Kalibrierung des Hodometers. Der vorgegebene Abstand zwischen Tachymeter und den Messprismen für die Roboterpositionierung ist erklärt worden. Der Messablauf innerhalb eines Messpunktfeldes wurde detailliert beschrieben. Die Berechnungswege für die Koordinierung des Tachymeterstandpunktes vor dem ersten Prismenring sind unter Einbeziehung von Längs- und Querneigungswerten, resultierend aus einer unhorizontierten Tachymeterstellung, ausführlich erläutert worden. Die Auswirkungen der Sensorgenauigkeiten auf den Prismensuchprozess wurden beschrieben. Die Berechnungen der Absteckwerte für die übrigen Prismen auf Basis von Tachymetermesswerten wurden eingehend erklärt. Das Problem der Prismenfindung in kleindimensionierten Tunneln, wo die Prismen fluchtpunktartig hintereinander eingebaut sind und sich dadurch mehr oder weniger alle im Gesichtsfeld des Tachymeters befinden, konnte durch einen darauf ausgerichteten und beschriebenen Messablauf gelöst werden. Nach dem Finden der Prismen werden diese eingemessen und in Koordinaten umgerechnet, die anschließend in das Ausgangskordinatensystem durch Transformation überführt werden. Die einzelnen Berechnungsschritte wurden erläutert. Die endgültig bestimmten Koordinaten werden rechnerisch in Beziehung zur Sollachse gesetzt und ergeben die Lage- und Höhenkorrekturwerte für die Vortriebsmaschinenfahrt.

Im Kapitel 7 wurden die Verfahren Polygonzugmessung und Messroboterkontrollvermessung durch Simulationsberechnungen verglichen. Für die Vergleichbarkeit wurden alle Berechnungen auf eine Polygonseitenlänge bzw. auf einen Prismenringabstand von 40m aus dem autonomen Messkonzept bezogen. Zusätzlich erfolgte ein Simulationsvergleich mit Zielweiten von 40-80m, da Polygonzüge im Regelfall mit größeren Zielweiten durchgeführt werden. Vergleiche beider Messverfahren wurden hinsichtlich der Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten der Messanordnungen durchgeführt. Der Vergleich hat gezeigt, dass das neue Verfahren zu einer merklichen Verbesserung der Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten am Zielschacht führt, was durch Werte aus der Praxis Bestätigung findet.

Das Kapitel 8 enthält die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die autonome Vortriebskontrolle. Die herkömmlichen Messzeiten für Vortriebskontrollvermessungen wurden in Beziehung zu den Messzeiten des autonomen Messroboterkontrollverfahrens gesetzt. Die Berechnungen



von Zeiten und Kosten zeigen, dass durch den Einsatz des autonomen Roboters nennenswerte Zeit- und Kosteneinsparungen erreicht werden. Die Anforderungen an den Arbeits- und Gesundheitsschutz werden durch das autonome Verfahren gänzlich erfüllt.

## Literaturverzeichnis

ADVANCED NAVIGATION (2013): Orientus, Version 1.2 vom 15.3.2013, Orientus Referenzhandbuch.pdf, <http://www.advancednavigation.com.au>, letzter Zugriff 3.3.2017.

BEETZ, A.: (2012): Ein modulares Simulationskonzept zur Evaluierung von Positionssensoren sowie Filter- und Regelalgorithmen am Beispiel des automatisierten Straßenbaus, DGK Deutsche Geodätische Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Dissertationen Reihe C, Heft Nr. 688.

BENECKE, N.; SCHULTHEISS, V. (2010): Ausgewählte Aufgaben der Vermessung im Tunnelbau am Beispiel des Brenner-Basistunnels, VDVmagazin61(2010) Nr.3, S.168-171.

BERNER, F.; KOCHENDÖRFER, B.; SCHACH, R. (2009): Grundlagen der Baubetriebslehre 3 – Baubetriebsführung. Vieweg + Teubner, Wiesbaden.

BG BAU (2015): Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft, Geböschte Baugruben und Gräben C469, <http://www.bgbau-medien.de>, letzter Zugriff 31.03.2017.

BOHNENSTINGL (2018): Bohnenstingl Spezialvermessungszubehör, Gesamtkatalog 2018, S.9, <http://www.bohnenstingl.de/bohlenstingl-katalog/>, letzter Zugriff 4.10.2017.

BOJE, R.; GSTIRNER, W.; SCHULER, D.; SPATA, M. (2008): Leitnivellements in Bodenbewegungsgebieten des Bergbaus – eine langjährige Kernaufgabe der Landesvermessung in Nordrhein-Westfalen, Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen, NÖV NRW, Jahrgang 2008, Heft 3, S.33-42.

BRYN, H.; OSADA, E. (2011): Zur Reduzierung von Refraktionseinflüssen in Tunnel-Vortriebsnetzen, Allgemeine Vermessungsnachrichten AVN 5/2011, S.170-177.

CAROSIO, A. (2008): Fehlertheorie und Ausgleichung, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Band 1, Bericht 310, <https://www.research-collection.ethz.ch>, letzter Zugriff 20.5.2016.

CENTERLINE GMBH (2005): System zur Datenerfassung und Vortriebssteuerung SDV13, Firmeninformationen / Produktinformationen, 11/2007.

DAUB (2010): Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. German Tunneling Committee (ITA-AITES) Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen, Köln, [www.daub-ita.de](http://www.daub-ita.de), letzter Zugriff 13.9.2017.

DE LANGE, N. (2013): Geoinformatik in Theorie und Praxis, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

DGUV (1997): Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Vorschrift 38, Unfallverhütungsvorschrift Bauarbeiten in der Fassung vom 1. Januar 1997.

DGUV Regel 101-007 (ehem. BGR 160): Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Bauarbeiten unter Tage.

DIN 18710-1 (2009): Ingenieurvermessung–Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

DMT (2013): Gyromat 5000, Datenblatt, <http://www.dmt.de>, letzter Zugriff 15.5.2017.

DWA-A125: DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 125.

ELING, B.; KEMPER-BÖNINGHAUSEN, R. (2014): DVW Merkblatt 8/2014, Vermessungspfeiler, DVW, Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.

ELING, D. (2009): Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung, DGK, Deutsche Geodätische Kommission der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Dissertationen Reihe C, Heft Nr.641.

ELMAGHRABY, S. (1989): Anlage und Optimierung von Tunnelnetzen mit Durchschlagsergebnissen einiger schematischer Beispiele. In: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr.162, Dissertation.

EMSCHERGENOSSENSCHAFT (2014): Abwasserkanal Emscher, Emscherschnellweg unter Tage, Informationsbroschüre der Emschergenossenschaft.

FAVRE, C.; HENNES, M. (2000): Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung, Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik (VPK) 2/2000, SIGImedia AG, Scherz, Schweiz, S.72-78.

FOPPE, K. (2001): Kombination von inertialen und satellitengestützten Beobachtungsverfahren zur ingenieurgeodätischen Überwachung von Brückenbauwerken, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 242, Hannover, 2001.

FREIBERGER PRÄZISIONSMECHANIK: Präzisionszenit- und Nadirlote FG-L30; FG-L100; Datenblätter, <http://www.fpm.de>, letzter Zugriff 2.10.2017.

FRIEDL, D.; LACH, R. (2008): Und sie bewegt sich doch! – Umstieg auf ETRS-89/UTM im Bodenbewegungsgebiet, NÖV NRW 3/2008, Aufsätze, Abhandlungen, S. 3-12.

FRÖHLICH, H.; KÖRNER, H. (1998): Refreshkurs Ausgleichsrechnung an der ehem. Universität-Gesamthochschule Essen (heute Universität Duisburg-Essen, UDE), Seminarunterlagen.

FUHRLAND, M. (2006): Bestimmung unterirdischer Punkte mit dem Tachymeter-Aufsatzsystem ArgusTAT. In: NIEMEYER, I.; SROKA, A.; WITTENBURG, R.: 7. Geokinematischer Tag. Verlag Glückauf GmbH, Essen, Mai 2006, (Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie), S. 387–394.

GEO-LASER GMBH (2015): Automatischer Dreifuß AD-12, Prospekt AD-12\_DE 12/2015, <http://www.geo-laser.de>, letzter Zugriff 15.7.2017.

GEOTEC, GEODÄTISCHE TECHNOLOGIEN GMBH: PANDA, Programmsystem zur Ausgleichung von geodätischen Netzen und zur Deformationsanalyse, aktuelle Version 5.21.

GLUNZ TECHNIK GMBH (2013): Produktkatalog, <http://glunz-technik.de>, letzter Zugriff 23.3.2017.

GOECKE (2014): Gesamtkatalog GK7, Datenblatt GPH1, <http://www.goecke.de>, letzter Zugriff 19.8.2017.

HENNES, M. (1998): Zum Einfluss inhomogener Brechungsindexfehler auf die Verschwenkung offener Polygonzüge am Beispiel des Tunnelvortriebs, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETHZ IGP, Mitteilung Nr.65.

HENNES, M. (2002): Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung, Flächenmanagement und Bodenneuordnung (FuB), Heft 2(2002), S.73-86.

HERRENKNECHT AG (2007): U.N.S (Universal Navigation System), Firmeninformationen / Produktinformationen, 11/2007.

HERRENKNECHT AG (2017a): Pioneering Underground Technologies, Separationsanlagen – Alles im Fluss, <http://www.herrenknecht.com/de/produkte/zusatzequipment/vortriebslogistik/separationsanlagen>, letzter Zugriff 31.03.2017.

HERRENKNECHT AG (2017b): Pioneering Underground Technologies, Tübbingausbau, <http://www.herrenknecht.com/de/innovation/know-how/tuebbingausbau>, letzter Zugriff 31.03.2017.

HEUNECKE, O.; KUHLMANN, H.; WELSCH, W.; EICHHORN, A.; NEUNER, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. Auflage, Herbert-Wichmann-Verlag Berlin und Offenbach.

HOKUYO (2017): Hokuyo UBG-04LX-F01, <http://www.hokuyo-aut.jp>, Specifications, letzter Zugriff 10.3.2017.

HUSER, R.; STUDER, M. (2010): WASSER I EAUX, Vermessung beim Bau des Trinkwasserstollens Uetliberg, gwa 8/2010, S.735-742.

INGENSAND, H. (2001): Systematische Einflüsse auf praktische Messungen mit dem Tachymeter und Digitalnivellier, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S.120-137.

IRSEN, W. (2006): Der geodätische Raumbezug in Nordrhein-Westfalen – gestern, heute und zukünftig, Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen, NÖV NRW, Jahrgang 2006, Heft 2, S.3-12.

JACOBS, E. (1991a): Präzisionslotungen und Richtungsübertragungen mittels Zenitdistanzmessung, Der Vermessungsingenieur 3/1991, S.111-114.

JACOBS, E. (1991b): Die Bau- und Vermessungsarbeiten für den Kanaltunnel Dover-Calais, Vermessung, Photographie, Kulturtechnik: VPK, Band 89 Jahr 1991, Heft 1.

KAHMEN, H. (1986): Vermessungskunde II, 14. Auflage, Sammlung Göschen, Walter de Gruyter, Berlin New York.

KAHMEN, H. (1993): Vermessungskunde, 18. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin New York.

KNOBLACH, S. (2009): Entwicklung, Kalibrierung und Erprobung eines kameraunterstützten Hängetachymeters, Technische Universität Dresden, Dissertation Dresden 2009.

KORITKE, N. (1997): Zur Anwendung hochpräziser Kreismessungen im Bergbau und Tunnel, Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Nr.14, Dissertation.

KRATZSCH, H. (2008): Bergschadenskunde, 5. Auflage, Deutscher Markscheider-Verein, Bochum.

KRICKEL, B.; KURTENBACH, E.; RIECKEN, J. (2016): Neuer Raumbezug 2016 für NRW, Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen, NÖV NRW, Jahrgang 2016, Heft 2, S.19-27.

KRÜGER, J. (1985): Abstecknetze, speziell für Tunnelabsteckungen, in: PELZER, H.: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Konrad Wittwer, Stuttgart, S.507-526.

KRÜGER, B.; MEYER-DIETRICH, U.; VON STILLFRIED, I. (2008): Gauß-Krüger-Koordinaten sind Geschichte, Praxisbericht der Einführung von ETRS89/UTM in Dortmund, Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungswesen, NÖV NRW, Jahrgang 2008, Heft 2, S.11-17.

LEICA (2009): Leica Geosystems, Vermessungsreflektoren - White Paper, Merkmale und Einflüsse, <https://www.leica-geosystems.de>, letzter Zugriff 29.05.2017.

LEICA (2010): Leica Geosystems, Leica Viva TS15, Datenblatt, <https://www.leica-geosystems.de>, letzter Zugriff 29.05.2017.

LEICA (2012): Eine knappe Angelegenheit, Leica Geosystems Kundenmagazin Reporter 67, Tunnel Cochem, S.20-22.

LEICA (2016): Leica Geosystems, Originalzubehör Katalog 2016, <https://www.leica-geosystems.com>, letzter Zugriff 2.10.2017.

LUTZ, A. (2008): Realisierung und Bewertung von Navigationsmethoden zur fahrzeugautonomen Positionsbestimmung mit low-cost Sensorik, Dissertation, Darmstadt 2008, D17.

MACHEINER, K.; WINDISCHER, G. (2013): Simulationsrechnung für den Durchschlag beim Brenner Basistunnel, VDVmagazin64(2013) Nr.2, S.96-100.

MAIDL, B.; HERRENKNECHT, M.; MAIDL, U.; WEHRMEYER, G. (2011): Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb. 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin.

MARX, H.J. (1989): Das automatische Tunnelbauführungssystem TUMA, VDV-Schriftenreihe Band 1: Aktuelle Ingenieurvermessung, Verlag Chmielorz, Wiesbaden, S.101-106.

MARX, H.J. (2007): Marx Ingenieurgesellschaft mbH, „Das automatische Tunnelbauführungssystem TUMA“, Firmeninformationen / Produktinformationen, 11/2007.

MATTHIAS, H.J. (1984): Tunnelnetze – Grundlagen, Numerische Untersuchungen zur Optimierung, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 38, 1984.

MEGATRON (2015): MAB36 SER, Datenblatt 6.2.2015, Megatron Elektronik GmbH & Co. KG.

MEISSL, P. (1969): Beiträge zur Theorie der geodätischen Netze im Raum, DGK, Reihe A, Nr.61.

MEYER, H. J. (2003): Anwendung von geodätischen Positionsmesssystemen in Straßenbaumaschinen, Baumaschinentechnik 2003 - Erfahrungen, Methoden, Innovationen – Fachtagung 20./21.03.2003 Dresden, Heft Nr. 23 der Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Bau- und Baustoffmaschinen 2003.

MORLOT, J.J. (1989): Méthode et construction du lien fixe transmanche: méthodes et instruments topométriques, Zeitschrift X,Y,Z der Association Française de Topographie, Nr. 40, Juillet 1989, S. 13-20.

MÖHLENBRINK, W.; SCHWIEGER, V. (2007): Zur Prozessintegration der geodätischen Messtechnik, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, AVN 11-12/2007, S. 403-410.

NAVRATIL, G.; STAUDINGER, M. (2006): Ausgleichungsrechnung II, Gerhard Navratil mit Beiträgen von Martin Staudinger, Institute for Geoinformation, Technical University Vienna, Austria, Stand 12. Dezember 2006, S.25-49, [https://www.tuwien.ac.at/suche\\_orientierung](https://www.tuwien.ac.at/suche_orientierung), letzter Zugriff 15.5.2017.

NIEMEIER, W.(1985): Netzqualität und Optimierung, in PELZER, H.: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Konrad Wittwer, Stuttgart, S.153-224.

NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichungsrechnung, 2. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin.

OUBBATI, M. (2012/13): Einführung in die Robotik, Autonome Mobile Roboter, Neuroinformatik, Universität Ulm, Institut für Neuroinformatik, WS 2012/13, <http://www.uni-ulm.de>, letzter Zugriff 15.9.2017.

PELZER, H. (1980): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung, Wittwer, Stuttgart.

PLACZEK, D.; BIELECKI, R.; MESSING, M.; SCHWARZER, F. (2016): Zielgenau bis ans Ende des Tunnels, Ernst & Sohn, Berlin.

RESNIK, B.; BILL, R. (2000): Vermessungskunde für den Planungs-, Bau- und Umweltbereich, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.

RINNER, K. (1976): Über die zweckmäßige Anlage von Tunnelnetzen, VII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung Darmstadt, S. 579-617.

RINNER, K.; SCHELLING, G. (1980): Bericht über Tunnelabsteckungen in Österreich, VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, D11-D26.

SCHAD, H.; BRÄUTIGAM, T.; BRAMM, S. (2008): Rohrvortrieb Durchpressung begehrbarer Leitungen, 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin.

SCHÄFER, M.; WEITHE, G. (2000): Messtechnische Konzepte im Tunnelbau von der Planung bis zur Fertigstellung, ZfV Zeitschrift für Vermessungswesen 125(2000)Nr.11, S.381-386.

SCHÄFER, M.; WEITHE, G. (2004): Vermessungstechnische Lösungen auf den Baustellen North Downs Tunnel und Brücke Medway Crossing- Hochgeschwindigkeitstrasse von London zum Eurotunnel, Bauingenieur 79(2004), S.280-285.

SCHÄTTI, I. (2006): Herausforderungen bei der Absteckung des Gotthard-Basistunnels, Geomatica Suisse 6/2006, S.322-325.

SCHERLE, M. (2003): Fernseminar Rohrvortrieb, Eröffnung, Eine Anwenderinformation für alle am Rohrvortrieb Interessierten, <http://www.maxscherle.com/start.htm>, Eröffnung.pdf, letzter Zugriff 16.4.2017.

SCHMIDT, T. (2010): Blick in den Startschacht für die neue U-Bahn-Strecke "Wehrhahnlinie" in Düsseldorf, Aufnahme vom 10.4.2010, <http://www.bahnbilder.de>, letzter Zugriff 7.4.2017.



SCHNEIDER, E.; SPIEGL, M.; TÜRTSCHNER, M.; LEITNER, W. (2010): Penetration, Meißelverschleiß und Vortriebsgeschwindigkeit für TBM-Vortriebe im Festgestein, Tunnel 7/2010, S.43-52.

SCHULTE, G.; LÖHR, W.; VOSEN, H. (1969): Markscheidekunde, 4. Auflage, Springer- Verlag Berlin Heidelberg New York.

SCHWIEGER, V.; BEETZ, A.; WENGERT, M.; SCHWEITZER, J. (2010): Echtzeit-Integration ingenieurgeodätischer Messsysteme in Bauregelkreise, Ingenieurvermessung 2010, Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2010, Herbert Wichmann Verlag, Berlin, S.45-56.

STEIN, D. (2003): Grabenloser Leitungsbau, Ernst & Sohn, Berlin.

STENGELE, R. (2007): Erster Hauptdurchschlag im Gotthard-Basistunnel, Ingenieurvermessung 2007, Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz 2007, Herbert Wichmann Verlag Heidelberg, S.3-16.

STENGELE, R.; SCHÄTTI-STÄHLIN, I. (2010): Grundlagen- und Hauptkontrollmessung im Gotthard-Basistunnel, Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel, Geomatik Schweiz, 12/2010, S.548-557.

TORGE, W. (2003): Geodäsie, 2. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin.

VDI-RICHTLINIE 2860: Industrieroboter-Definition nach VDI 2860, <http://www.vdi.de>, letzter Zugriff 2.10.2017.

VMT GMBH (2007): Das Steuerleitsystem für Rohrvortriebe, SLS-RV, Firmeninformationen / Produktinformationen, 11/2007.

WARCHOLIK, M. (2011): Positionsbestimmung mit Hilfe von Inertialsensorik und Filteralgorithmen, Fachhochschule Aachen, Seminararbeit, 15.12.2001.

WITTE, B; SCHMIDT, H. (2000): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen, 4. Auflage, Konrad Wittwer Stuttgart.

WENDEL, J. (2007): Integrierte Navigationssysteme- Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München.

WUNDERLICH, T. (1995): Schräglotung mit dem Theodolit, Vortrag Türkisch-Österreichische Geodätische Tage (Neue Technologien in der Geodäsie), TU Istanbul.

## **Danksagung**

Ich möchte mich zuerst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Niemeier bedanken, der mich ermuntert hat, über die neuen Vortriebskontrollvermessungen eine Dissertation zu schreiben. Auslöser war ein von mir gehaltener Vortrag zum genannten Thema auf einem Geokinematischen Tag in Freiberg. Ohne seine Anregung wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. In vielen Gesprächen hat er mir wertvolle Hinweise und Unterstützung gegeben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schwieger danke ich für die Übernahme des Korreferats. Im Rahmen eines Kolloquiums durfte ich das Messrobotersystem einer breiteren Öffentlichkeit vorstellen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Schwieger für die gewinnbringenden Diskussionen, die für meine Arbeit sehr hilfreich waren.

Meinen Vorgesetzten bei der Emschergenossenschaft Essen, besonders dem Technischen Vorstand Herrn Dr. Emanuel Grün, gilt mein Dank für die Erlaubnis, auf Projektdaten und Testergebnisse zurückgreifen zu dürfen.

Meiner Kollegin Frau Manuela Nie und meinen Kollegen Herrn Marcel Gorniak und Herrn Holger Berning danke ich für die Unterstützung und intensiven fachlichen Diskussionen während der Projektarbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Eling bedanke ich mich für die wertvollen Gespräche, um die Arbeit abschließen zu können.

Meiner Frau Marion danke ich von ganzem Herzen für ihr Verständnis, für ihre Unterstützung und Motivation. Sie hat auf viele gemeinsame Stunden verzichten müssen.